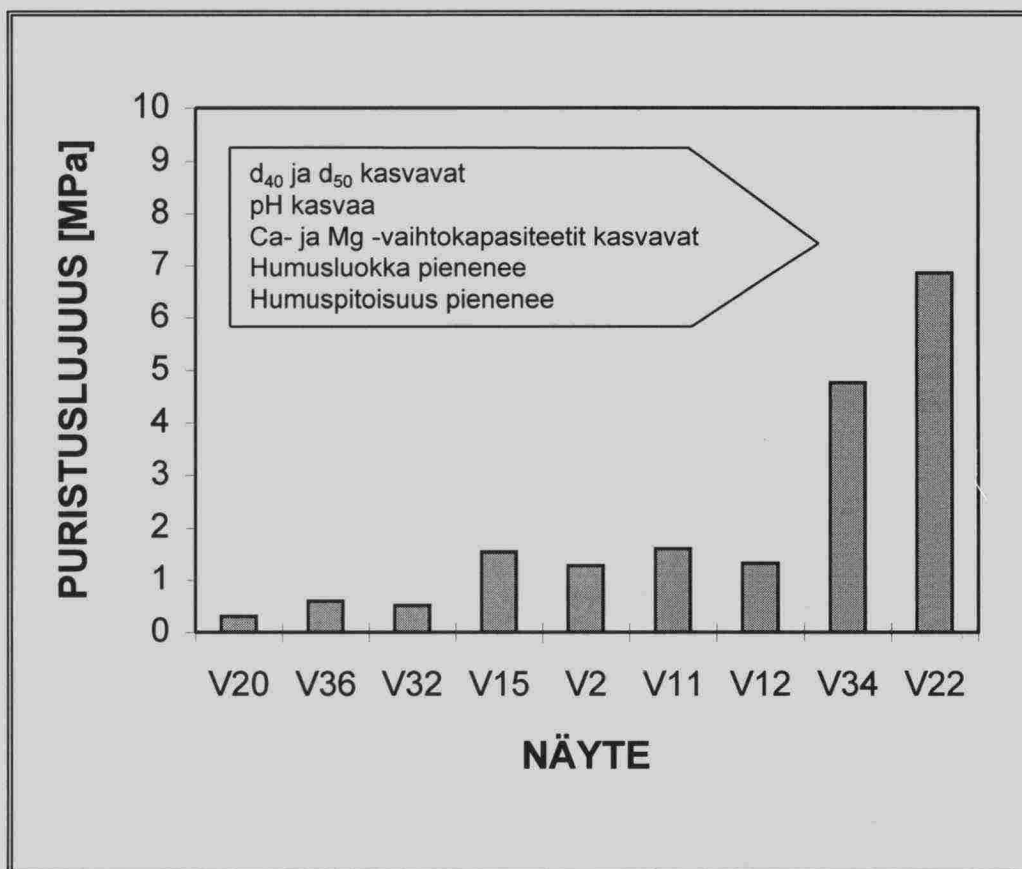


Tien rakennekerrosmateriaalin stabilointi masuunikuonatuotteilla



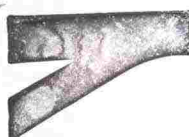
Tielaitoksen
selvityksiä

29/1996

Oulu 1996

Geokeskus
Oulun kehitysyksikkö

08 TIEL



**Tielaitos
Kirjasto**

Doknro: 960596
Nidenro: 960810

Tielaitoksen selvityksiä
29/1996

Marko Mäkikyrö

**Tien rakennekerrosmateriaalin stabilointi
masuunikuonatuotteilla**

Tielaitos
Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö

Oulu 1996

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-228-0
TIEL 3200397
Oy Edita Ab
Helsinki 1996

Julkaisun kustannus ja myynti:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotepalvelut
Telefax (90) 1487 2652

Joutsenmerkin arvoinen paperi

Tielaitos

Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 148 721

Geokeskus
Oulun kehitysyksikkö
Kansankatu 53
PL 261
90101 OULU
Puh. (981) 310 9383

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa on selvitetty stabiloitavissa tiemateriaaleissa lujittumiseen vaikuttavat tekijät ja näitä kuvaavat tunnusluvut, kun sideaineina ovat masuunihiekka ja kuonajauhe. Kuonasideaineiden aktivaattorina on käytetty Megasementtiä. Vertailusideaineina ovat olleet valssimurskattu granuli ja Yleissementti. Ensisijaisena tarkastelun kohteena ovat olleet vanhat tiemateriaalit. Tutkittavia lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ja näitä kuvaavia tunnuslukuja oli kaikkiaan 57 kappaletta.

Lujittuminen on erittäin vaikeasti ennustettava asia. Mikään lujittumiseen vaikuttava tekijä ei ole selvästi selittävä, vaan sementtiaktivoiduilla kuonajauheella ja masuunihiekalla stabiloimalla saavutettava loppulujuus on monen vaikuttavan tekijän summa. Lujuuteen selvimmin vaikuttavia, rutiininomaisesti määritettäviä tekijöitä ja tunnuslukuja ovat molemmilla kuonasideaineilla hienoaineksen humuspitoisuus, humusluokka, koko stabiloitavan tiemateriaalin pH sekä läpäisyprosentteja 40 ja 50 vastaavat raekoot. Kuonajauheella vaikuttavat edellisten lisäksi hienoaineksen pH ja läpäisyprosenttia 30 vastaava raekoko. Hienoaineksen vähäisellä määrällä sekä hiekka- ja soralajitteen määrällä on jonkin verran vaikutusta lujuuteen. Edellisten lisäksi lujuuteen selkeästi vaikuttavia tekijöitä ovat hienoaineksen kalsiumin- ja magnesiuminvaihtokapasiteetit sekä kationinvaihtokapasiteetti laskettuna 1-arvoiselle metallille.

Valssimurskatulla granulilla stabiloitaessa riittää tätä sideainetta puolet masuunihiekan määrästä, kun pyritään samaan lujuustasoon kuin masuunihiekalla stabiloitaessa. Kun joko sementtiaktivoitua kuonajauhetta tai Yleissementtiä oli samat määrät, saatiin sementillä parempia lujuuksia. Poikkeuksena oli puhdas kalliomurske, jota kuonajauhe lujitti paremmin. Kuonajauheella saatuihin huonompiin tuloksiin on syynä kuonan hidas hydrataatioreaktio ja herkkyys humuksen haittavaikutuksille.

MÄKIKYRÖ, Marko: Tien rakennekerrosmateriaalin stabilointi masuunikuonatuotteilla [Stabilization of the road base material by blast furnace slag products], Oulu 1996, Tielaitos, Geokeskus, Oulun kehityksikkö, Tielaitoksen selvityksiä 29/1996, 57 p. + app. 16 p., ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-228-0, TIEL 320 0397

Key words: road construction, pavement, stabilization, blastfurnace slag

ABSTRACT

A survey is made of the factors affecting the strength increment achieved in road construction materials stabilized using granulated blastfurnace slag and ground granulated blastfurnace slag as binding agents with Megacement as the activator, and of the indices descriptive of these factors. Preground granulated blastfurnace slag and ordinary Portland cement were used for reference purposes. The examination was concentrated primarily on old road materials, and a total of 57 factors affecting strength and the indices related to these were studied.

The strengthening effect of stabilization is extremely difficult to predict, and no single distinct explanatory factor could be identified, but rather the final strength obtained with cement-activated granulated blastfurnace slag as such or in ground form was found to be the sum of numerous factors that influenced the situation to some degree. The most prominent factors with both binders are the humus content of the fine fraction, calcium and magnesium exchange capacity of the fine fraction, cation exchange capacity calculated for metals of valency 1, humus classification, pH of the whole body of material to be stabilized and maximum grain sizes of the finest 40% and 50% of the material. In the case of the ground granulated blastfurnace slag the outcome was also affected by the pH of the fines and the maximum grain size of the finest 30% of the material. A low proportion of fines and the amounts of sand and gravel assortments present also influence strength properties to some extent. Factors and indices that can best be made use of in routine cases in order to develop appropriate binder dosage instructions are the maximum grain sizes of the finest 40% and 50% of the material, humus classification, humus content and pH of the fine fraction, and the amounts of sand and gravel present.

About half the amount of binder is required to achieve the same strength increment when preground blastfurnace slag is used as with granulated blastfurnace slag. On the other hand, better strength results were obtained with ordinary Portland cement than with the same amount of cement-activated ground granulated blastfurnace slag in all cases except with pure crushed aggregate, where the latter was more successful. The reasons for the poorer results generally obtained with ground granulated blastfurnace slag may well lie in its slow hydration reaction and susceptibility to the detrimental effects of humus.

ALKUSANAT

Oulun yliopiston rakentamistekniikan osaston geotekniikan laboratoriossa käynnistyi vuoden 1995 helmikuussa viisivuotinen Kuonat geotekniikassa - tutkimusprojekti, jonka lopputuloksena on vuosituhannen loppuun mennessä suunnittelu-, mitoitus- ja rakennusohjeet kuonatuotteiden käytölle geo- ja tietekniikassa. Projektin rahoittavat SKJ Yhtiöt Oy, TEKES ja Rautaruukki Oy. Lisäksi tutkimusprojektiin osallistuu tielaitoksen geokeskuksen Oulun kehitysyksikkö.

Yksi osa Kuonat geotekniikassa -projektia on masuunikuonatuotteiden käytön kehittäminen tien rakennekerrosten stabiloinnissa. Ensimmäisenä vaiheena tutkimuksessa tehtiin systemaattinen selvitys masuunikuonatuotteilla stabiloitavassa tien rakennekerros materiaalissa lujittumiseen vaikuttavista tekijöistä. Tämä tutkimusvaihe on perustana jatkossa suoritettaville sideaineiden laadun ja määrän optimointiin sekä mitoitusparametrien määrittämiseen tähtääville tutkimuksille.

Kuonat geotekniikassa -projektin tutkimus- ja kehitystyötä ohjaa johtoryhmä, johon kuuluvat FT Aimo Hiltunen (puheenjohtaja) ja rakennuspäällikkö Jari Lappi SKJ Yhtiöt Oy:stä, DI Esko Pöyliö Rautaruukki Oy:stä, DI Seppo Salmenkaita tielaitoksen geokeskuksen Oulun kehitysyksiköstä sekä TkT Kauko Kujala ja DI Marko Mäkikyrö (sihteeri) Oulun yliopiston geotekniikan laboratorion. Vastuullisena tutkijana projektissa toimii Marko Mäkikyrö.

Oulussa huhtikuussa 1996

Geokeskus
Oulun kehitysyksikkö

 SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	MASUUNIKUONAN TUOTANTO JA OMINAISUUDET	11
2.1	Masuunikuonan tuotanto	11
2.2	Kemialliset ja tekniset ominaisuudet	11
3	GRANULOIDUT MASUUNIKUONATUOTTEET STABILOINNISSA	15
3.1	Käytön edellytykset	15
3.2	Masuunihiekka	15
3.3	Valssimurskattu granuli	17
3.4	Kuonajauhe	17
4	LUJUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	18
4.1	Raekokojakauma ja kiviaineksen laatu	18
4.2	Orgaaninen aines	19
5	TUTKIMUSMATERIAALIT	20
5.1	Tiemateriaalit	20
5.2	Sideaineet	20
6	TUTKIMUKSEN TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI	21
6.1	Tutkimuksen sisältö	21
6.2	Tiemateriaalien ominaisuudet	21
6.2.1	Raekokojakaumat	21
6.2.2	Humuspitoisuus, humushappopitoisuus ja humusluokka	23
6.2.3	Maksimikuivatilavuuspaino, optimivesipitoisuus ja tiiviysaste	24
6.2.4	Muotoarvot	25
6.2.5	Kivilajit ja mineraalit	25
6.2.6	pH	26
6.2.7	Sähkönjohtokyky ja vaihtuvat kationit	26
6.2.8	Yhteenveto tiemateriaalien ominaisuuksista	27
6.3	Puristuslujuus ja lujuuteen vaikuttavat tekijät	27
6.3.1	Koekappaleiden valmistaminen ja koestus	27
6.3.1.1	Vanhat tiemateriaalit ja uudet kalliomurskeet	27
6.3.1.2	Variointimateriaalit	28

6.3.2	Puristuslujuudet	29
6.3.2.1	Lujuustarkastelun jaottelu	29
6.3.2.2	Sementtiaktivoitu masuunihiekka	30
6.3.2.3	Sementtiaktivoitu kuonajauhe	32
6.3.2.4	Vertailusideaineet	33
6.3.2.5	Variointimateriaalit	35
6.3.3	Lujuuteen vaikuttavat tekijät	39
6.3.3.1	Tarkastelun perusteet	39
6.3.3.2	Kiviaineksesta riippuvat tekijät	42
6.3.3.3	Orgaanisesta aineksesta ja kemiallisista olosuhteista riippuvat tekijät	45
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	53
8	KIRJALLISUUSLUETTELO	56

LIITTEET

1 JOHDANTO

Masuunikuonaa on käytetty Suomessa tienrakennusmateriaalina 1960-luvulta lähtien. 1980-luvulla on sen käyttö ilmajäähdytettynä kappalekuonana ja siitä murskaamalla saatavana masuunikuonamurskeena saanut vakiintuneet muotonsa. Kappalekuonaa on käytetty tien kantavan, jakavan ja eristyskerroksen materiaalina ja masuunikuonamursketta tasaukseen kivi-materiaalin tai karkean kuonamateriaalin päällä, jolloin se on samalla osa kantavaa kerrosta. Masuunikuonan vesijäähdytyksessä syntyvän masuunihiekan eli granulin käyttö on voimakkaasti lisääntynyt 1980-luvun lopulla ja erityisesti 1990-luvulla.

Masuunihiekan kappalekuonaa ja kuonamursketta paremmat hydrauliset ja lämpötekniset ominaisuudet ovat yksi keskeinen syy käytön lisääntymiseen. Toisaalta luonnonmateriaalien yhä vaikeampi saatavuus on pakottanut tienrakentajat etsimään vaihtoehtoisia materiaaleja. Masuunihiekkaa on käytetty sekä massiivirakenteena että sementtiaktivoituna ja aktivoimattomana stabiloinnin sideaineena. Masuunihiekasta jauhamalla saatavan kuonajauheen käyttö on vielä vakiintumatta tien rakennekerrosten stabiloinnissa.

Pääosa Suomessa tuotettavasta masuunikuonasta tulee Rautaruukki Oy:n Raahen terästehtaan kahdesta masuunista. Vuosina 1995-1996 käynnissä olevien masuuniremonttien yhteydessä on valmistunut myös kuonan suoragranulointilaitos. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tulevaisuudessa lähes kaikki Raahen masuunikuona tulee olemaan vesijäähdytettyä masuunihiekkaa.

Stabiloitavassa tien runkoaineessa lujittumiseen vaikuttavia tekijöitä ei ole systemaattisesti tutkittu, vaikka masuunihiekan käyttö tien rakennekerrosten stabiloinnissa on erityisesti 1990-luvulla saanut vakiintuneita muotoja. Keskeisiltä ominaisuuksiltaan eli rakeisuudeltaan ja humusluokaltaan hyvin samankaltaisillakin stabiloitavilla materiaaleilla on saatu vaihtelevia tuloksia, vaikka on käytetty samoja sideainemääriä. Erityisesti vanhojen tiemateriaalien stabiloinnissa on lujuuskehityksessä ollut poikkeamia. Myös kuonajauheella on jo vähäistenkin käyttökokemusten perusteella havaittu samanlaisia tuloksia lujuuskehityksessä.

Tässä tutkimuksessa on selvitetty stabiloitavan tien runkoaineen lujittumisen ja eri ominaisuuksien sekä ominaisuuksia kuvaavien tunnuslukujen välistä riippuvuutta. Ensisijaisina sideaineina ovat olleet seulotun masuunihiekan alite (# 0-3 mm) ja kuonajauhe (Blaine-luku 400 m²/kg). Vertailusideaineina on käytetty Yleissementtiä ja masuunihiekasta murskaamalla saatavaa valssimurskattua granulia, joka ei ole vielä tuotannossa oleva tuote. Sitoutumisreaktion aktivaattorina kuonasideaineilla on käytetty Megasementtiä. Stabiloitavat runkoaineet ovat pääasiassa olleet vanhoja tiemateriaaleja.

Tutkimuksen tulosten analysointi perustuu yksiakseliseen puristuslujuuteen. Tällöin on huomattava, että vaikka saavutettu lujuus olisikin jollakin runkoaineella hyvä, sen toimivuus tiessä ei välttämättä ole paras mahdollinen. Lujuustarkastelu toimii lähtökohtana, kun kehitetään eri menetelmillä määritettäviä tunnuslukuja, joiden avulla voidaan mahdollisimman vähäisin ennakkokokein valita lujuuden kannalta optimaalisin sideainekoostumus kullekin stabiloitavalle materiaalille ja tämän jälkeen määrittää mitoitusparametrit.

2 MASUUNIKUONAN TUOTANTO JA OMINAISUUDET

2.1 Masuunikuonan tuotanto

Masuunikuona on terästeollisuudessa raakaraudan valmistuksen yhteydessä syntyvä sivutuote, jota tuotetaan Suomessa Oy Fundia Wire Ab:n Koverharin terästehtaalla ja Rautaruukki Oy:n Raahen tehtaalla. Masuunikuonaa tuotettiin vuonna 1995 yhteensä noin 456 000 tonnia. Tuotanto on normaalia vähäisempi johtuen Raahen terästehtaan masuuniremontista. Tällä hetkellä myynnissä olevia tienrakennuksessa käytettäviä masuunikuonatuotteita ovat ilmajäähdytetty kappalekuona ja siitä murskaamalla saatava kuonamurske, sekä vesijäähdytetty masuunihiekka ja tästä edelleen jauhattava kuonajauhe. Tienrakennukseen masuunikuonaa käytettiin vuonna 1995 322 000 tonnia. Tulevaisuudessa vesijäähdytettyjen kuonatuotteiden osuus tulee huomattavasti kasvamaan johtuen Raahen tehtaan tuotantomuutoksesta, jonka seurauksena lähes koko kuonatuotanto on masuunihiekkaa. Tulevaisuudessa ilmajäähdytettyjen masuunikuonatuotteiden tuotanto on siten huomattavasti vähäisempää.

Masuunihiekka syntyy vesijäähdytyksen eli granuloinnin tuloksena (kuva 1). Tästä syystä siitä käytetään myös nimitystä granuli. Vesijäähdytyksessä sulaa kuonaan suihkutetaan vettä noin 8 barin paineella, jonka seurauksena sula kuona rikkoutuu raekooltaan 0-5 mm:n lasimaiseksi, huokoiseksi tuotteeksi. Tässä tutkimuksessa käytetyn vanhalle tavalla granuloidun masuunihiekan lasimaisuusaste on noin 95 %. Syntynyttä masuunihiekkaa voi edelleen jalostaa hienontamalla sitä valssimurskaimella, jolloin saadaan valssimurskattua granulia. Kuivaamalla, murskaamalla ja jauhamalla masuunihiekkaa valmistetaan kuonajauhetta. Jalostuksen myötä masuunihiekan reaktiivisuus kasvaa, koska reagoivan pinnan määrä kasvaa raekoon pienentyessä.

Raahen tehtaalla toteutettavien masuuniremonttien yhteydessä on valmistunut suoragranulointilaitos. Suoragranuloinnin etuna vanhaan valmistustapaan verrattuna on masuunihiekan entistä tasaisempi laatu senkkavaunuisissa tapahtuvan sulan kuonan kuljetuksen jäädessä pois. Suoragranuloidun masuunihiekan lasimaisuusaste on 98-100 %.

2.2 Kemialliset ja tekniset ominaisuudet

Masuunikuonien pääkomponentit ovat piin, kalsiumin, alumiinin ja magnesiumin oksidit. Vähäisempinä pitoisuuksina esiintyvistä rikistä, titaanista, alkaaleista ja mangaanista on erityisesti rikillä olennainen merkitys masuunihiekan kemiallisiin ominaisuuksiin. Kemialliset ominaisuudet eivät kuitenkaan riipu pelkästään koostumuksesta vaan myös valmistusprosessiin liittyvästä nopeasta vesijäähdytyksestä, jonka seurauksena masuunikuonalle muodostuu lasimainen, huokoinen sisäinen rakenne. Kemiallinen koostumus

ja lasimainen rakenne antavat masuunihiekalle sen hydrauliset ominaisuudet (Tielaitoksen selvityksiä 47/1994).

Sementtiin verrattuna masuunikuonan kemiallinen koostumus poikkeaa selvimmin siten, että CaO -pitoisuus on huomattavasti pienempi ja SiO₂ -pitoisuus suurempi (taulukko 1). Kemialliselta koostumukseltaan Raahan ja Koverharin masuunikuonat ovat lähellä toisiaan.

Taulukko 1: Raahan ja Koverharin masuunikuonien kemiallinen koostumus. Vertailumateriaalina on portlandsementti (Hiltunen et al. 1995, Viljas 1995).

Yhdiste	Masuunihiekka, %		Portlandsementti %
	Raaha	Koverhar	
CaO	37,2	36,2	60-70
SiO ₂	35,5	37,4	18-24
Al ₂ O ₃	8,5	9,5	3-8
MgO	11,4	12,7	0-3
Fe _{tot}	0,43 ¹⁾	0,10 ¹⁾	2-6 ²⁾
S	1,7	1,1	0,5-1
1) Rautaoksidit + rauta			
2) FeO:n määrä			

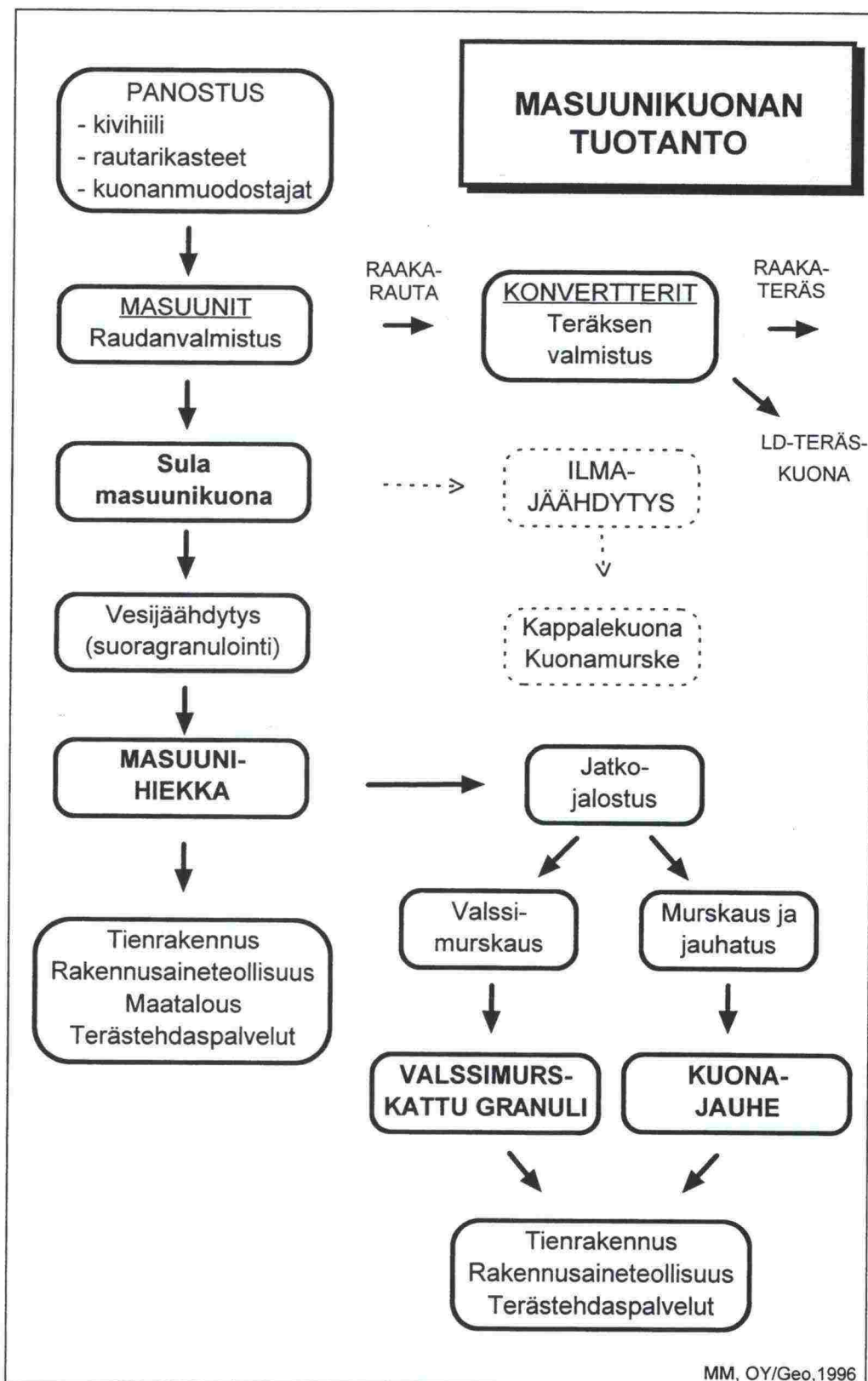
Masuunikuonan sitoutuminen on hidas prosessi, jota voidaan kiihdyttää erilaisin aktivaattorein. Yleisin Suomessa käytetty aktivaattori on sementti, mutta myös mm. kalkkia ja kipsiä on kokeiltu (Pylkkänen & Valkonen 1993). Paras ja turvallisin on kuitenkin sementti, koska se sekä luovuttaa tarvittavaa kalkkia että reagoi itse ja siten lujittuu.

Sitoutuminen tapahtuu aina masuunikuonan rakeiden pinnalla. Rikkoutunut rakenne alkaa lujittua uudelleen, koska tällöin paljastuu uusia reaktiivisia pintoja. Tämä ominaisuus on omiaan lisäämään masuunihiekalla stabiloitujen tierakenteiden kestoikää.

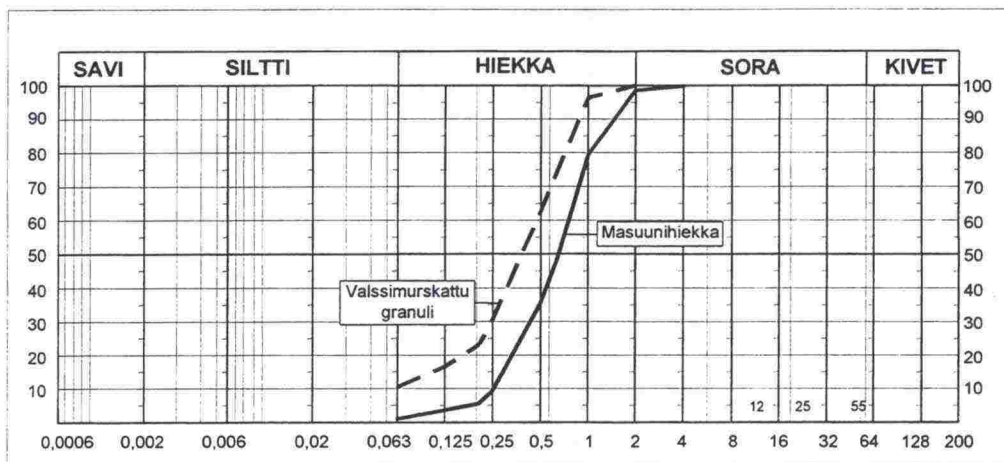
Rakeisuudeltaan masuunihiekka on hyvin paljon luonnonhiekan kaltainen tuote (kuva 2). Luonnonhiekaan verrattuna sen rakeet ovat teräväsärmäisempiä ja seassa on neulamaisia kiteitä.

Valssimurskattu granuli ei ole tuotannossa oleva tuote, vaan sitä on kokeilu- luontoisesti käytetty joissakin tutkimuksissa ja koerakenteissa. Hienomman rakeisuutensa vuoksi se on masuunihiekkaa reaktiivisempi (kuva 2).

Kuonajauheen yleisin hienous eli Blaine-luku on $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$, kun se sementteillä vaihtelee laadusta riippuen välillä $360\text{...}530 \text{ m}^2/\text{kg}$. Ulkoisesti kuonajauhe on hyvin paljon sementin kaltainen tuote. Väriltään se on yleismenttiä hieman vaaleampaa.



Kuva 1: Masuunikuonan tuotanto. Julkaisua tehtäessä valssimurskattu granuli ei ole vielä tuotannossa oleva tuote.



Kuva 2: Masuunihiekan ja valssimurskatun granulin tyypilliset rakeisuuskäyrät.

3 GRANULOIDUT MASUUNIKUONATUOTTEET STABILOINNISSA

3.1 Käytön edellytykset

Granuloitujen masuunikuonatuotteiden käyttö tien rakennekerrosten stabiloinnin sideaineena ei edellytä mitään erityistoimenpiteitä materiaalien ja työtekniikan suhteen. Työt voidaan tehdä tienrakentajien käytössä olevilla nykyisillä stabilointikoneilla ja -laitteilla. Granuloiduista masuunikuonatuotteista on tehty erilaisia koerakenteita tien jakavaan ja kantavaan kerrokseen. Lisäksi kuonajauhetta on kokeiltu savisoratien kulutuskerroksen sitomiseen. Tulokset koerakenteista ovat olleet hyviä.

3.2 Masuunihiekka

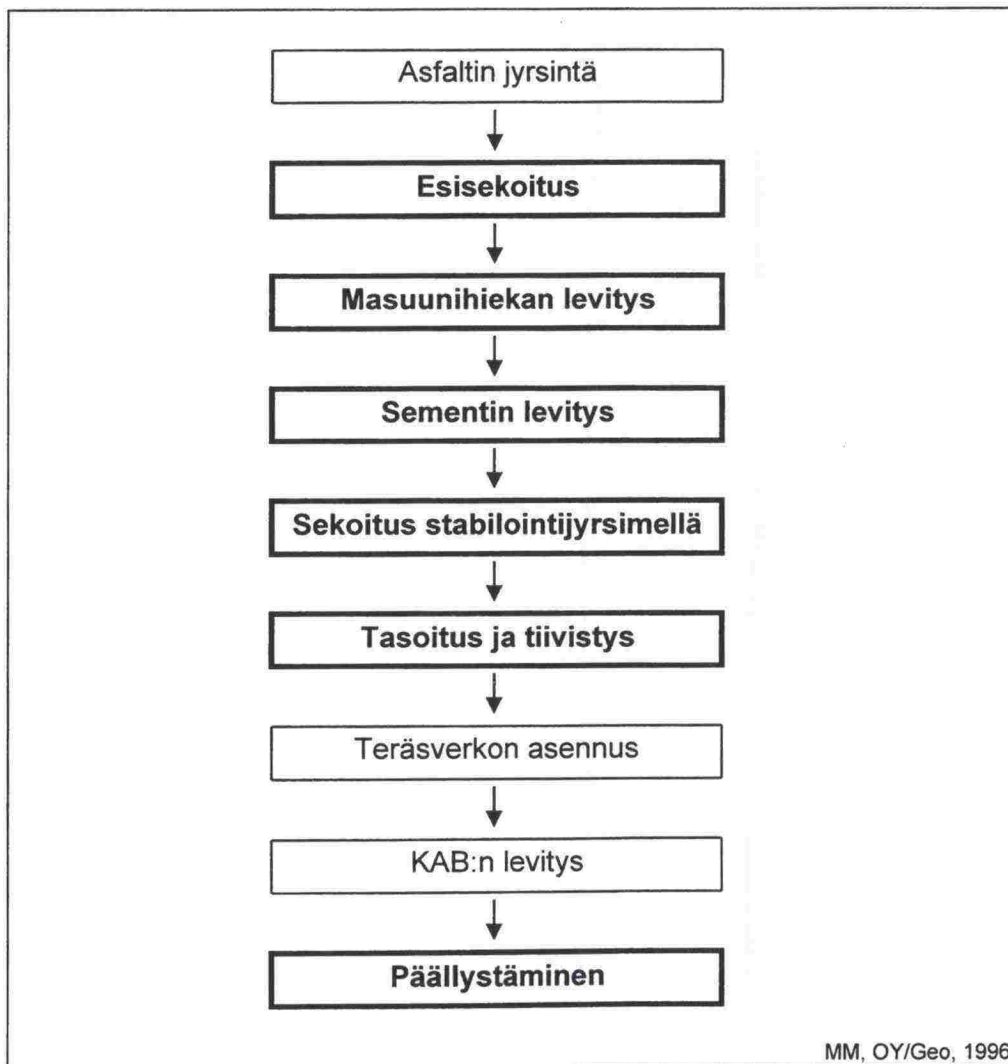
Granuloidun masuunikuonan käyttö tienrakennuksessa on 1990-luvulla voimakkaasti lisääntynyt. Sitä käytetään masuunihiekkana sekä massiivirakenteena että stabiloinnin sideaineena joko sementtiaktivoituna tai ilman aktivaattoria. Massiivirakenteena käytettäessä voidaan hyödyntää masuunihiekan hyviä lämpötekniisiä ominaisuuksia. Myös kantavuusarvot tällaisilla rakenteilla ovat erinomaisia. Masuunikuonan käyttö tien päällysrakennekerroksissa on ohjeistettu sekä ilmajäähdytetylle (Tielaitoksen selvityksiä 15/1993) että granuloidulle (Tielaitoksen selvityksiä 47/1994) tuotteelle. Masuunihiekkastabiloinnin alustava ohje on valmistumassa ja sitä tullaan täydentämään Kuonat geotekniikassa -projektin tulosten mukaan.

Masuunihiekka toimii stabiloinnissa sekä rakeisuuden parantajana että sideaineena. Ajan myötä rakeisuutta parantava vaikutus luonnollisesti väheenee sitovan vaikutuksen kasvaessa. Rakeisuuden parantaminen on ajankohtaista, kun tierakenteen kantava kerros on hienontunut niin paljon, että se on muuttunut routivaksi. Hienonemista tapahtuu paitsi rakennustyön aikana, myös valmiissa rakenteessa liikennekuormituksen ja olosuhdetekijöiden yhteisvaikutuksesta.

Masuunihiekan etu stabiloinnissa sementtiin verrattuna on hidas sitoutumisaika. Tällöin stabiloidun tien työstettävyyssä on pitempi. Lisäksi vanhojen teiden masuunihiekkastabiloinnissa liikenteelle ei tule juurikaan liikkum rajoituksia työn joustavan luonteen vuoksi. Menetelmän hyvänä puolena voi pitää myös sitä, että parannettava tie voidaan päällystää välittömästi stabiloinnin jälkeen. Stabiloinnin sideaineena käytettäessä kuljetuskustannuksetkaan eivät muodostu kohtuuttomiksi, koska tarvittava masuunihiekan määrä neliömetriä kohden on pieni.

Oulun tiepiirin alueella on vakiintunut käytäntö, jossa vanhojen teiden kantavuutta parannetaan sementtiaktivoidulla masuunihiekillä paikallasekoitteisesti (kuva 3). Ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan esisekoitus, jossa

päällyste ja vanha kantava kerros tai stabilointisyvyyden vahvuinen kerros sekoitetaan esimerkiksi stabilointijyrsimellä. Asfalttipäällysteisissä teissä jyrätään vanha päällyste ennen varsinaista esisekoitusta, kun taas öljysora-päällysteisissä teissä esisekoitus voidaan tehdä suoraan ilman vanhan päällysteen käsittelyä. Tämän jälkeen levitetään masuunihiekkaa ja sen päälle sementtiaktivaattoria valitun sideainereseptin mukainen määrä. Sideaineiden levityksen jälkeen suoritetaan varsinainen sekoitus stabilointijyrsimellä yhtenä ylityskertana. Stabiloituun kerrokseen voidaan asentaa teräsverkko pahimmin roudan vaurioittaneille alueille. Tämän jälkeen tie tasataan ja jyrätään haluttuun tiiveyteen. Tasoituksen ja tiivistyksen jälkeen levitetään öljysora valmiille pinnalle. Asfalttipäällysteisissä teissä levitetään ensin kevytasfalttibetoni ja varsinainen päällyste muutaman päivän kuluttua. Näin voidaan vielä tasata mahdollisia painumia. Työteho tällä menetelmällä on noin 8 000 - 12 000 m² / työvuoro.



Kuva 3: Masuunihiekalla paikallasekoitteisesti suoritettava stabilointi.

3.3 Valssimurskattu granuli

Valssimurskattua granulia (# 0-2 mm) voi stabiloinnissa käyttää samalla periaatteella kuin masuunihiekkaa. Hienommasta rakeisuudesta johtuen valssimurskattu granuli on masuunihiekkaa huomattavasti reaktiivisempaa. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että valssimurskatun granulin käytöllä saataisiin aikaan huomattavia säästöjä kuljetuskustannuksissa, koska tarvittava sideainemäärä on pienempi masuunihiekkaan verrattuna.

3.4 Kuonajauhe

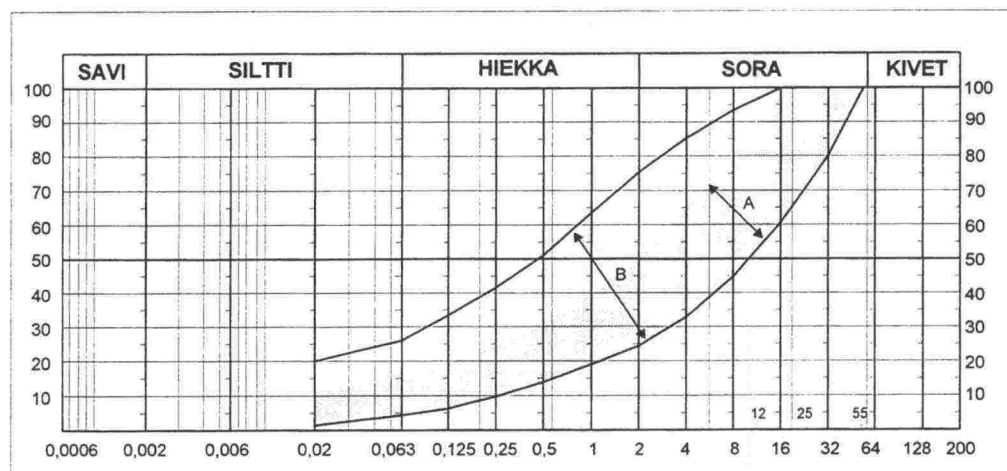
Sementtistabilointiohjeen (Sementtistabilointiohje 1992) mukaan kuonajauhetta saa käyttää korkeintaan 50 % sideaineen määrästä. Ohjeen mukaan on syytä käyttää portlandsementtiä, mikäli humuksen määrä on suuri (humusluokka > III). Käytölle asetetut rajoitukset ovat seurausta kuonajauheen hitaasta reaktiosta. Sementtistabilointiohjeen mukaan kantavan kerroksen lujuus 7 vrk:n iässä tulisi olla 5 MPa ja näin suurta lujuutta on kuonajauheella vaikea saavuttaa lyhyessä ajassa.

Kuonajauhetta on käytetty lähinnä kokeiluluontoisesti eikä systemaattiselle käytölle ole ollut erityistä mielenkiintoakaan onnistuneista koerakenteista ja hyvistä tutkimustuloksista huolimatta. Syynä tähän on se, että sementin käytöllä on pitkät perinteet tienrakennuksessa ja toisaalta masuunihiekka on osoittautunut sellaisenaan ilman jauhatusta erinomaiseksi stabiloinnin sideaineeksi.

4 LUJUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

4.1 Raekokojakauma ja kiviaineksen laatu

Suomessa hydraulisilla sideaineilla tapahtuvaa tien rakennekerrosten stabilointia varten on olemassa ainoastaan sementtistabilointiohje. Sen mukaan sementillä stabiloitavaksi sopivat kuvan 4 ohjealueilla A-B olevat kitka- ja välimaalajit. Optimirakeisuusalue on A. Humukseton ja suhteistunut murskattu sora on parasta maabetonin runkoainesta. Kiviaineksen on oltava vähintään III-luokan kiviainesta. Runsaasti kiisukasaumia tai kiillepakkoja sisältävä kiviaines on rapautumisherkkää ja lujuudeltaan heikkoa. Tällainen kiviaines murtuu heikkojen mineraaliosueiden, esimerkiksi kiillepintojen kautta (Sementtistabilointiohje 1992).



Kuva 4: Sementillä valmistettavan maabetonin kiviaineksen ohjealue (Rahiala 1988, Sementtistabilointiohje 1992).

Masuunihiekkastabilointi on käytännössä lähes poikkeuksetta paikallastabilointia. Eräs keskeinen ongelma vanhojen tiemateriaalien paikallastabiloinnissa on se, että mahdollisuudet vaikuttaa rakeisuuteen ja kiviaineksen laatuun ovat hyvin rajalliset. Stabiloinnin yhteydessä on poistettu ylisuuria kiviä, jotka hidastavat tai jopa vaurioittavat koneita. Toinen tapa vaikuttaa rakeisuuteen on joissakin kohteissa ollut korjata hieman roikkuvaa rakeisuuskäyrää masuunihiekan lisäyksellä. Tällä toimenpiteellä saavutetaan luonnollisesti ajan myötä runkoaineen laadusta riippuen ainakin jossakin määrin sidottu rakenne.

Uusien sideaineiden käytössä on huomattava, että perinteiset ohjeet esimerkiksi rakeisuuden suhteen eivät välttämättä ole kovin mielekkäitä. Haluttu lopputulos voidaan saavuttaa huomattavasti huonommallakin kiviainekselä.

4.2 Orgaaninen aines

Maaperä sisältää orgaanista ainesta, joka koostuu lukuisista eri komponenteista. Nämä ovat muodostuneet kasvien ja eliöiden jäänteistä lähinnä mikrobiologisten ja kemiallisten tekijöiden vaikutuksesta, toisin sanoen maatumisen seurauksena (Rantala 1990).

Maaperän sisältämästä orgaanisesta aineksesta voi olla jopa 80-90 % maatumisen tuloksena syntynyttä humusta. Humus puolestaan koostuu humusaineista, joita ovat humus- ja fulvohapot sekä humiinit. Humushapot liukenevat emäksiseen vesiliuokseen ja fulvohapot sekä happo- että emäsliuokseen, mistä johtuen ne voivat osallistua sideaineen ja maa-aineksen väliin reaktioihin. Humiinit ovat käytännöllisesti katsoen heikkoihin happoihin ja emäksiin liukenemattomia eli ne eivät vaikuta stabiloinnissa lujuuskehitykseen (Rantala 1990).

Orgaanisen aineksen ja sideaineen välistä vuorovaikutusta on tutkittu lähinnä sementillä. Orgaaninen materiaali sitoo kalsiumioneja, jotka vapautuvat sementin hydrataatiossa. Sen lisäksi vapautuu vetyioneja ja pH putoaa tasolle, joka on alhaisempi kuin mitä sementin hydrataatioreaktiolle on välttämätöntä. Aluminaatteja ja silikaatteja liukenee saostuakseen geeliksi sementti-partikkelin ympärille, minkä seurauksena normaali hydrataatio estyy (Höbeda 1984, Sherwood 1960). Toisin sanoen seoksessa tulee olla tarpeeksi kalsiumioneja, jotta niitä riittää sekä humuksen sitomiseen että stabiloitavan materiaalin lujittumiseen. Edellä esitetty humuksen vaikutus pätee myös masuunikuonalle, mutta humuksen haittavaikutus on kuonalle suurempi, koska itse kuonan reaktiokin tarvitsee ulkopuolista kalkin lähdettä. Tällöin kalsiumia kuluu sekä humuksen eliminointiin että kuonan aktivoimiseen.

Humuksen vaikutusta lujittumiseen voidaan tutkia pH:n avulla, joka kuvaa materiaalin happamuutta. pH:n kasvaessa lisääntyy emäksisyys ja hydraulisesti toimivan sideaineen, kuten sementti ja masuunikuona, reagoinnin edellytykset paranevat.

5 TUTKIMUSMATERIAALIT

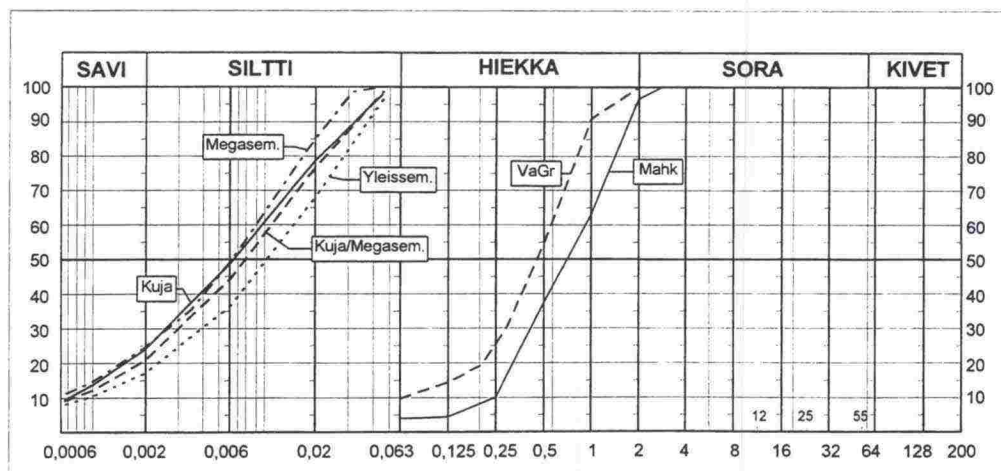
5.1 Tiemateriaalit

Vanhat tiemateriaalit (V) hankittiin erilaisista tienparannuskohteista. Pyrkimyksenä oli saada mahdollisimman erityyppisiä runkoaineita. Vanhoja tiemateriaaleja hankittiin 39 kappaletta, joista yksi (V21) jouduttiin hylkäämään, koska sen todettiin olevan lähes yksinomaan rouhittua asfalttia. Päälystetyistä teistä näytteet otettiin 200 mm:n vahvuudelta päälysteen alta ja soraista pinnasta 200 mm:n syvyydelle. Uusia murskeita (U) hankittiin neljää eri tyyppistä. Liitteessä 1 on esitetty tutkimusmateriaalien hankintatiedot.

5.3 Sideaineet

Pääasiallisina sideaineina olivat Rautaruukki Oy:n 3 mm:stä katkaistun masuunihiekan alite (Mahk) ja kuonajauhe (Kuja), jonka Blaine-luku on 400 m²/kg. Masuunihiekan osalta päädyttiin normaalia hienorakeisempaan tuotteeseen, koska tiedettiin, että suoragranuloidun masuunihiekan rakeisuuskäyrästä tulee jonkin verran pystympi ja siten hienompien lajitteiden suhteellinen osuus kasvaa.

Valssimurskaimella murskattua masuunihiekkaa eli valssimurskattua granulaa (VaGr) käytettiin suppeammassa laajuudessa. Tässä tutkimuksessa oli tarkoitus saada tietoa valssimurskatun granulin soveltuvuudesta stabiloinnin sideaineeksi lähinnä masuunihiekan korvaajana. Vertailun vuoksi on osassa kokeita käytetty myös Finnsementti Oy:n Yleissementtiä. Kuonasideaineita käytettiin aina sementtiaktivoituna. Aktivaattorina käytettiin Finnsementti Oy:n Megasementtiä. Tutkimuksessa käytettyjen sideaineiden raekokojaumat on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5: Tutkimuksessa käytettyjen sideaineiden raekokojaumat. Masuunihiekan ja valssimurskatun granulin (keskimääräiset) rakeisuudet on määritetty seulomalla ja muiden sideaineiden Coulter LS 230 -hiukkaskokoanalysaattorilla.

6 TUTKIMUKSEN TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI

6.1 Tutkimuksen sisältö

Pääpaino tutkimuksessa on vanhojen tiemateriaalien lujittumiseen vaikuttavien tekijöiden ja näitä tekijöitä kuvaavien tunnuslukujen selvittämisessä. Tutkimuksessa on myös tarkasteltu neljän uuden kalliomurskeen osalta lujittumiseen vaikuttavia tekijöitä. Joihinkin lujittumiseen vaikuttaviin tekijöihin on pyritty saamaan vahvistavaa tietoa puhtaalla kalliomurskeella tehdyillä variointeilla, joita olivat synteettisen humushapon määrän variointi ja hienoaineksen määrän variointi. Osa vanhoista tiemateriaaleista suhteutettiin samalle rakeisuudelle. Tällä tavalla saatiin eliminoiduksi rakeisuuden vaikutus pois.

6.2 Tiemateriaalien ominaisuudet

6.2.1 Raekokojakaumat

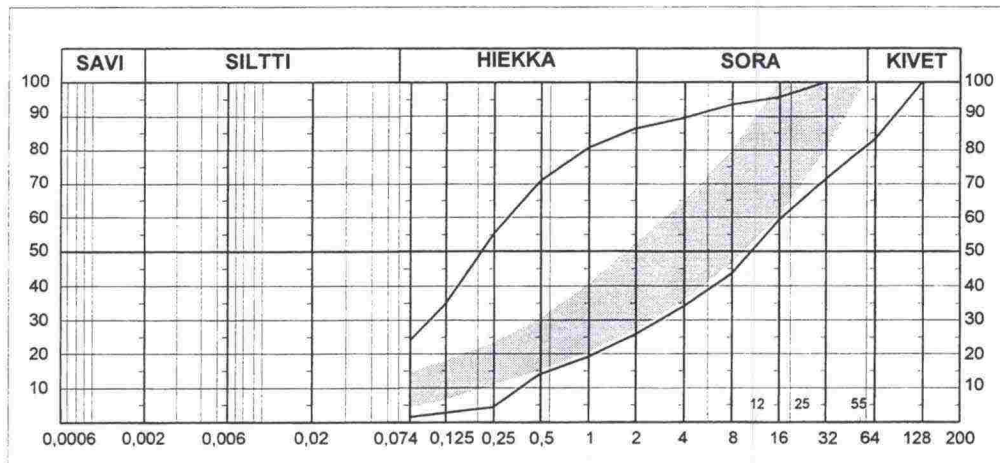
Raekokojakauma määritettiin pesuseulomalla Geoteknisten laboratorio-ohjeiden (GLO-85) mukaan kahdelle rinnakkaiselle noin 6-7 kg:n näytteelle. Hienoaineksen raekokojakauma määritettiin Rautaruukki Oy:n tutkimuskeskuksessa hiukkaskokoanalysaattorilla Coulter LS 230, joka on valon siron-taan perustuva hiukkaskokoanalysaattori. Hiukkaskoon määrittämiseen käytetään LS-sarjan analysaattoreissa aallonpituudeltaan 750 nm:n laservaloa ja määritettävät hiukkaset ovat halkaisijaltaan 0,04-2000 µm (Coulter LS 230 -manuaali 1995, Rautaruukki Oy:n laatukäsikirja 1995). Lopulliset raekokojakaumat saatiin yhdistämällä pesuseulonnan ja hiukkaskokoanalysaattorin tulokset.

Tutkimusnäytteiden raekokojakaumat on esitetty liitteessä 2. Liitteessä 3 on näytteiden raekokojakaumat 16 mm:n läpäisseeistä aineksesta.

Vanhojen tiemateriaalien raekokojakaumat olivat hyvin vaihtelevia (kuva 6). Pienin hienoaineksen määrä oli 1,9 % ja suurin 23,5 %. Vastaavat arvot hiekkalajitteelle olivat 19,3 % ja 63,7 % sekä soralajitteelle 13,5 % ja 74,1 %. Yli puolella vanhoista tiemateriaaleista hienoaineksen määrä oli välillä 5-10 % ja kuudella näytteellä hienoainespitoisuus oli alle 5,0 %. Yli puolella hiekkalajitteen määrä oli 30-50 % ja soralajitteen vastaavasti 40-60 %.

Monilla vanhoilla tiemateriaaleilla rakeisuuskäyrä oli muodoltaan melko suora. Lisäksi tyypillistä oli, että useissa käyrissä oli lievä kohouma noin 2 mm:n raekoon kohdalla. Tämä voi olla seurausta tiemateriaaleissa ajan myötä tapahtuneesta hienonemisesta ja rakeiden rikkoutumisesta. Muutamien näytteiden (esim. V1 ja V20) raekokojakaumat olivat 'kantavan' kerroksen materiaaleiksi huomattavasti nykyisistä ohjealueista poikkeavia. Syynä tähän lie-

nee se, että osassa teistä ei ole varsinaisia rakennekerroksia laisinkaan. Niitä on liikennemäärien kasvaessa vähitellen korjailtu ja levennetty ilman varsinaisten rakennekerrosten tekoa. Joidenkin näytteiden (esim. V7 ja V36) suuri hienoainespitoisuus johtuu saviorasta, joka on ollut tien kulutuskerroksena. Joissakin teissä oli päällyste lähes suoraan vanhan saviorapinnan päällä. Raekokojakaumien perusteella voidaan todeta, että vanhoissa teissä voi stabiloitavien materiaalien raekoostumus olla hyvinkin vaihtelevaa.



Kuva 6: Rakeisuusalue, jolle kaikki näytteet sijoittuvat. Varjostettu alue on maabetonin ohjealue, kun sementtipitoisuus on 4-6 %. Noin 40 % näytteistä oli tällä alueella.

Uusista kalliomurskeista näyte U2 suhteitettiin suoraan jyräbetonin ohjekäyrälle ja on siten valmiiksi 0-16 mm:n lajitetta. Näyte U1 on 0-32 mm:n lajitetta. Muodoltaan näiden murskeiden raekokojakaumat ovat hyvin samankaltaisia. Näytteet U3 ja U4 ovat myös noin 0-32 mm:n lajitetta, mutta verrattuna U1:een niiden käyrät ovat roikkuvia.

Tässä tutkimuksessa lujittumiseen vaikuttavia rakeisuustekijöitä tarkastellaan 16 mm:n läpäisseen aineksen raekokojakaumien perusteella, koska koekappaleet on tehty tästä lajitteesta. Kun näytteestä seulotaan yli 16 mm:n rakeet pois on luonnollista, että sorajajitteen määrä on joskus jopa huomattavastikin pienempi kuin tiessä olevassa materiaalissa. Tällöin hiekkalajitteen ja hienoaineen määrät korostuvat eikä ole mielekäästä verrata 16 mm:n läpäissellä aineksella saatuja tuloksia raekokojakaumaltaan aineksiin, joissa voi olla jopa isoja kiviä seassa. Muodoltaan sekä tiessä olevan materiaalin että 16 mm:n läpäisseen aineksen rakeisuuskäyrät ovat yleensä hyvin samanlaisia.

Vanhojen tiemateriaalien 0-16 mm:n aineksessa pienin hienoaineen määrä oli 3,2 % ja suurin 26,2 %. Vastaavat arvot hiekkalajitteelle olivat 27,0 % ja 81,9 % sekä sorajajitteen 10,1 % ja 63,7 %. Hieman yli kolmanneksella näytteistä hienoaineen määrä oli 5-10 %. Alle 16 mm:n lajitteiden raekokojakaumat ovat kaikilla uusilla kalliomurskeilla hyvin samankaltaisia: hienoainesta on 6,5-8,1 %, hiekkalajitetta 23,4-36,8 % ja sorajajitetta 55,1-70,0 %.

6.2.2 Humuspitoisuus, humushappopitoisuus ja humusluokka

Humuspitoisuus (orgaanisen aineksen määrä) määritettiin polttomenetelmällä GLO-85:n mukaan paitsi, että uunikuivaa näytettä poltettiin $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$:een sijasta $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa neljä tuntia. Lopullinen humuspitoisuus saatiin laskemalla kahden rinnakkaisen näytteen polttohäviöiden keskiarvo. Kideveden poistumisesta aiheutuvaa korjausta ei tehty, koska savilajitteen osuutta on karkean materiaalin hienoaineksesta vaikea määrittää.

Humushappojen määrä mitattiin Oulun yliopiston epäorgaanisen kemian osastolla uuttamalla hienoaineksesta erilleen humushapot, joiden määrä punnittiin.

Humusluokka määritettiin 16 mm:n läpäisseelle ainekselle NaOH-kokeella GLO-85:n mukaan 0,5 kg:n näytteelle.

Näytteiden humuspitoisuudet, hienoaineksen humushappopitoisuus ja humusluokat on esitetty liitteessä 4. Suurin hienoaineksen humuspitoisuus oli 5,81 % ja pienin 0,51 %. Koko näytteellä eli 0-16 mm:n aineksella vastaavat arvot olivat 1,72 % ja 0,35 %. Hienoaineksen humuspitoisuudet olivat 20:llä näytteellä välillä 1,8-3,0 %, mikä on lujuuden ennustamisen kannalta vaikein alue. Näillä humuspitoisuuksilla osa näytteistä lujittui kohtalaisesti, mutta osa tuskin lainkaan.

Hienoaineksen humushappopitoisuudet vaihtelivat välillä 0,10-1,17 % kaikkien näytteiden keskiarvon ollessa 0,51 % hienoaineksen massasta. Humushappopitoisuus oli 33:lla näytteellä alle kolmanneksen humuksen (orgaanisen aineksen) massasta.

Humusluokkaan I ei kuulunut yhtään tutkimusmateriaaleista. Huomattava osa näytteistä oli humusluokkaa IV. Kuitenkin tässä luokassa oli erotettavissa ruskeaksi ja mustaksi värjäytyneet liukset. Tämän vuoksi päätettiin luokitusta muuttaa siten, että lisättiin luokka V, johon kuuluivat selkeästi mustat näytteet. Näin saatiin IV-luokassakin hieman eroa eri näytteiden välille.

Humusluokan värin tulkinta on usein varsin subjektiivista ja eri ohjeissakin voivat eri luokkiin kuuluvien värien määritykset hieman vaihdella. Tässä tutkimuksessa luokitus tehtiin Geoteknisten laboratorio-ohjeiden (GLO-85) värimääritysten perusteella.

Humuspitoisuudesta puhuttaessa tarkoitetaan yleensä polttamalla saatavaa painohäviötä näytteessä. Tämä painohäviö on kuitenkin käytännössä hyvin useasti koko orgaanisen aineksen määrä eikä siis pelkkä humuksen määrä. Stabiloinnin onnistumisen ennustettavuuden kannalta tämä tarkoittaa sitä, että polttomenetelmällä saadaan sellaistenkin aineiden määrät, jotka eivät liukene veteen eivätkä siten voi vaikuttaa hydrataatioreaktioon. Esimerkiksi oksanpalaset ja havuneulaset eivät värjää liuosta NaOH-kokeessa, mutta

palavat poltettaessa eli ne vääristävät polttomenetelmällä ilmoitettavaa 'humuspitoisuutta'.

NaOH-kokeella määritetyssä humusluokassa ilmenevät puolestaan kaikki veteen (heikkoon emäkseen) liukenevat ainekset. Kuitenkin on mahdollista, että kaikki liukenevat aineet eivät värjää liuosta tai niiden värjäysvaikutus vaihtelee eri näytteiden välillä. Esimerkiksi humushapot ovat tumman ruskeita ja niillä on siten voimakas vaikutus NaOH-liuoksen väriin kun taas fulvo-happojen väri vaihtelee keltaisesta ruskeaan eli niiden vaikutus liuoksen väriin voi vaihdella eri näytteiden välillä.

6.2.3 Maksimikuivatilavuuspaino, optimivesipitoisuus ja tiiviysaste

Maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus määritettiin parannetulla proctor -menetelmällä 27 vanhalle tiemateriaalille GLO-85:n mukaan. Määritykset tehtiin 16 mm:n läpäselle ainekselle.

Kaikkien 27:n näytteen maksimikuivatilavuuspainojen keskiarvo on 21,7 kN/m³ ja vastaava optimivesipitoisuudelle 6,1 % (taulukko 2). Koekappaleet valmistettiin 7 %:n vesipitoisuudessa tiiveystavoitteen ollessa 21,5 kN/m³. Tiiviysaste oli sementtiaktivoiduilla masuunihiekalla stabiloiduille koekappaleille keskimäärin 98,5 % ja sementtiaktivoidulla kuonajauheella stabiloiduille vastaavasti 99,0 %. Kaikille näytteille valittiin sama tiiviystavoite, koska edeltä käsin ei tiedetty, saadaanko kaikkia materiaaleja riittävästi proctor-sullontoja varten. Tulosten mukaan valittu tiiviystavoite on varsin hyvä. Vesipitoisuus oli hieman liian korkea.

Taulukko 2: Vanhojen tiemateriaalien optimivesipitoisuudet ja näitä vastaavat maksimikuivatilavuuspainot.

Näyte	γ_{dmax} [kN/m ³]	w_{opt} [%]	Näyte	γ_{dmax} [kN/m ³]	w_{opt} [%]
V1	21,08	6,39	V22	22,38	6,65
V2	22,65	5,87	V23	21,95	6,53
V3	22,09	5,15	V24	22,72	5,38
V4	22,37	5,20	V27	22,49	5,63
V5	22,42	5,64	V28	20,76	5,64
V6	19,83	9,37	V29	22,19	4,19
V7	22,17	5,23	V30	22,53	5,40
V9	22,17	5,46	V32	22,19	5,09
V10	21,17	7,14	V35	22,42	5,07
V11	20,03	7,35	V36	21,87	6,21
V13	21,34	7,35	V37	22,40	4,98
V15	21,77	6,54	V38	22,04	5,05
V19	21,43	6,02	V39	21,74	6,71
V20	18,98	8,21			

6.2.4 Muotoarvot

Muotoarvot määritettiin Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeiden (Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, osa II 1974) mukaisesti niille vanhoille tiemateriaaleille, joille tehtiin suhteitus samalle rakeisuudelle (kohta 6.3.1.2). Määritykset tehtiin 8-16 mm:n lajitteelle automaattisesti lukevalla työntömitalla.

Muotoarvoiltaan näytteet olivat varsin samankaltaisia (taulukko 3). Eri näytteiden väliin pieniin eroihin lienee ainakin osittain syynä tutkimusmateriaalien ikä eli ne olivat monissa tapauksissa ainakin jossain määrin 'hioutuneet'.

Taulukko 3: Vanhoille tiemateriaaleille mitatut muotoarvot ja muotoluku.

Näyte	Puikkoi- suus	Liuskei- suus	Muoto- luku	Näyte	Puikkoi- suus	Liuskei- suus	Muoto- luku
V2	2,78	1,82	39	V24	2,54	1,67	49
V5	2,31	1,49	66	V27	2,28	1,55	64
V10	2,11	1,44	71	V28	1,98	1,41	85
V13	2,06	1,49	75	V29	1,96	1,43	84
V16	1,78	1,35	95	V32	1,95	1,43	87
V18	2,18	1,53	76	V36	2,03	1,44	83
V19	2,00	1,46	80	V38	2,01	1,45	82
V23	2,46	1,63	56				

6.2.5 Kivilajit ja mineraalit

Kivilaji- ja mineraalimääritykset tehtiin Oulun yliopiston geologian laitoksella (Hiltunen, R. 1994). Kivilajit määritettiin punnitsemalla suhteellisina osuuksina yli 16 mm:n lajitteesta. Hienoaineksen mineraalit tutkittiin Oulun yliopiston elektronioptiikan laitoksella Siemens D5000 -diffraktiometrillä.

Näytteiden koostumus noudatti karkeasti arvioiden alueiden yleistä kivilajikoostumusta. Esimerkiksi Oulun ympäristöstä hankituilla näytteillä oli Karjalaiselle liuskekivivyöhykkeelle ominaisesti suhteellisen paljon erityisesti kiilleliuskeita ja -gneissejä graniittien lisäksi (Hiltunen, R. 1994).

Röntgendiffraktioajojen tuloksissa ei ole suuria poikkeavuuksia eri alueilta otettujen näytteiden välillä. Mineraalikoostumus on kutakuinkin sama kaikissa näytteissä. Kvartsi, plagioklaasi, muskoviitti ja kalimaasälpä esiintyvät lähes kaikissa näytteissä. On kuitenkin huomattava, että tuloksista ei näy, missä suhteessa kutakin mineraalia on.

Seitsemän näytteen (V15, V16, V22, V25, V26, V31 ja V35) kohdalla on vaikea varmuudella sanoa, sisältävätkö näytteet savimineraaleja (illiitti), koska muskoviitin ja illiitin piikit sijoittuvat lähekkäin diffraktiokuvissa. Savimineraa-

lien esiintyminen on mahdollista, mutta joka tapauksessa niiden määrä on vähäinen (Hiltunen 1994).

Yhteenvedona kivilaji- ja mineraalimääryksistä voidaan todeta, että vanhoissa tiemateriaaleissa ei juurikaan esiinny kemiallisesta rapautumisesta muodostuvia sekundäärisiä mineraaleja, vaan runkoainesten hienoaines johtuu pääsääntöisesti kivilajien mekaanisesta hienonemisesta (Hiltunen 1994).

6.2.6 pH

Hienoaineksen pH-määrykset tehtiin kahdelle rinnakkaiselle näytteelle. pH mitattiin hienoaineksen ja tislattun veden liuoksesta Schott:n pH-Meter CG 822 -mittarilla lattapääelektrodia käyttäen. Koko näytteen pH mitattiin samalla periaatteella yhden millimetrin läpäisseeistä aineksesta. Lopullinen pH saatiin laskemalla rinnakkaisnäytteiden keskiarvo.

Näytteiden pH:t on esitetty liitteessä 4. Suurimmat pH-arvot olivat luonnollisesti uusilla murskeilla, koska niissä ei ole epäpuhtauksia, kuten orgaanista ainesta. Kyseessä on siten nimenomaan kiviaineen pH. Hienoaainesten pH:t vaihtelivat välillä 7,89...9,34 ja alle 1,0 mm:n lajitteen 8,56...9,48.

Vanhoilla tiemateriaaleilla pienin hienoaineksen pH oli 4,39 ja suurin 8,12. Vastaavat arvot alle 1,0 mm:n lajitteelle olivat 5,03 ja 8,83. Ainoastaan yhdellä vanhalla tiemateriaalilla oli pH samaa suuruusluokkaa kuin uusilla murskeilla. Saksassa (Jelinek et al. 1980) esitetyn arvion mukaan materiaalin pH:n tulisi olla yli 7, jotta se oli sementtistabilointiin kelpavaa. Tällä kriteerillä tässä tutkimuksessa käsitellyistä materiaaleista ainoastaan viisi kelpaisi siten sementtistabilointiin, joten näin tarkkojen rajojen asettaminen yhden tekijän osalta on vähintäänkin kyseenalaista.

Hienoaineksen pH on lähes kaikilla materiaaleilla pienempi kuin $< 1,0$ mm:n lajitteella. Tämä johtuu siitä, että hienoaineksessa humuksen pH:ta alentava vaikutus korostuu, koska sen suhteellinen osuus hienoaineksessa on suurempi kuin $< 1,0$ mm:n lajitteessa.

6.2.7 Sähkönjohtokyky ja vaihtuvat kationit

Sähkönjohtokyky mitattiin samasta näytteestä kuin hienoaineksen pH siten, että pH:n mittauksen jälkeen lisättiin näytteeseen 50 ml tislattua vettä ja ravisteltiin 30 minuuttia tasoravistelijassa. Ravistelun jälkeen näyte suodatettiin C-paperin (huokoskoko $\sim 1 \mu\text{m}$) läpi ja tämän jälkeen mitattiin sähkönjohtokyky suodoksesta Consort Conductometer K 611 -mittarilla lasielektrodia käyttäen.

Näytteiden kalsiumin, magnesiumin ja natriumin määrät mitattiin Oulun yliopiston epäorgaanisen kemian osastolla suodoksesta PU 7000 Philips induktiiviplasma-atomiemissiospektrometrillä. Kaliumin määrä mitattiin Spectra

Span III B yksikanavaisella kaariplasma-atomiemissiospektrometrilla. Kationinvaihtokapasiteetit saatiin laskemalla mitatun konsentraation perusteella.

Sähkönjohtokyvyssä on huomattavia eroja eri näytteiden välillä pienimmän arvon ollessa 0,0022 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ja suurimman 1749,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (liite 4). Joidenkin näytteiden suuri sähkönjohtokyky voi olla seurausta tien suolauksesta.

Vaihtuvien kationien määrät ovat tyypillisiä tämänkaltaisille materiaaleille. Esimerkiksi kalsiuminvaihtokapasiteetin arvot ovat pieniä verrattuna saviin. VTT:llä tehdyissä tutkimuksissa (Ruohomäki 1995) saatiin lihaville saviille Ca-kapasiteetin arvoja 25,4-91,2 me Ca/100 g. Erot karkean materiaalin ja lihavien savien kalsiuminvaihtokapasiteettien välillä on hyvä osoitus savien 'aktiivisemmasta' luonteesta. Näytteiden kalsiumin-, magnesiumin-, natriumin- ja kaliuminvaihtokapasiteetit sekä 1-arvoiselle metallille laskettu vaihtuvien kationien kapasiteetti on esitetty liitteessä 4.

6.2.8 Yhteenveto tiemateriaalien ominaisuuksista

Vanhon tiemateriaalien raekokojakaumat olivat hyvin vaihtelevia. Tämä on selvä osoitus siitä, että paikallasekoitteisesti suoritettavassa stabiloinnissa ei runkoaine välttämättä noudata jotain tiettyä ohjealuetta. Toisaalta on huomattava, että osa tutkimusmateriaaleista oli teistä, joita ei ole edes järkevää parantaa stabiloimalla vähäisen liikenteen vuoksi. Uudet kalliomurskeet olivat valmiiksi tien rakennekerrokseen tehtyä kiviainesta, joten niiden rakeisuuksissa ei luonnollisesti ollut mitään odottamatonta.

Myös humuspitoisuus ja humushappopitoisuus vaihteli vanhoissa tiemateriaaleissa huomattavasti. Muutama näyte oli verrattavissa lähes puhtaaseen murskeeseen. Osassa oli humusta stabiloinnin kannalta huomattavan paljon. Hyvin suuri osa näytteistä kuului humusluokkaan IV. pH:t olivat vanhoilla tiemateriaaleilla pääsääntöisesti happaman puolella ja kaikilla uusilla kalliomurskeilla reilusti emäksisen puolella. Kivilajien ja mineraalien osalta vanhat tiemateriaalit ovat stabiloinnin kannalta ongelmattomia.

6.3 Puristuslujuus ja lujuuteen vaikuttavat tekijät

6.3.1 Koekappaleiden valmistaminen ja koestus

6.3.1.1 Vanhat tiemateriaalit ja uudet kalliomurskeet

Kaikki koekappaleet valmistettiin samoilla sideainemäärillä stabiloitavan materiaalin laadusta riippumatta. Sideainereseptit olivat seuraavat:

- *masuunihiekka*: runkoaine 89 %, Mahk 10 %, Megasementti 1 % (osuudet koko seoksen kuivapainosta).
- *kuonajauhe*: sideainepitoisuus 3 % runkoaineen kuivapainosta, sideaineessa 70 % kuonajauhetta ja 30 % Megasementtiä.

- *valssimurskattu granuli*: runkoaine 94 %, VaGr 5 %, Megasementti 1 % (osuudet koko seoksen kuivapainosta).
- *Yleissementti*: sideainepitoisuus 3 % runkoaineen kuivapainosta.

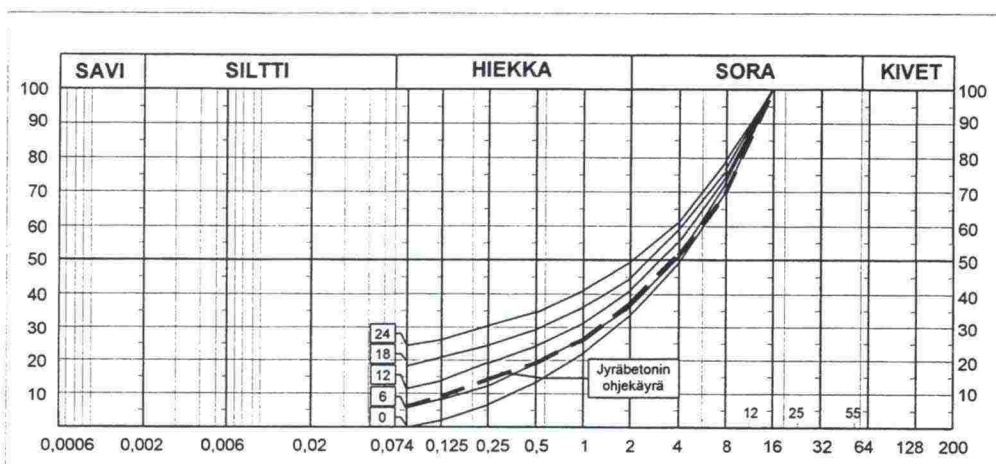
Koekappaleiden massat sekoitettiin pylväsporakoneeseen asennetulla sekoittajalla siten, että ensin sekoitettiin kuiva, 16 mm:n seulan läpäissyt runkoaine ja sideaineet ja tämän jälkeen lisättiin vettä 7 % koko seoksen kuivapainosta. Sekoitusta jatkettiin, kunnes ainekset olivat tasaisesti sekaisin. Yhdestä sekoitetusta massasta tehtiin aina yksi koekappale 28 ja toinen 91 vrk:n koestusta varten. Tällä tavalla varmistettiin se, että mahdolliset punnitusvirheet havaittaisiin viimeistään koestusten yhteydessä suurena hajontana tuloksissa. Sideaineina käytettiin kaikissa massoissa sementtiaktivoitua masuunihiekkaa ja kuonajauhetta. Vertailusideaineina olleita valssimurskattua granulia ja Yleissementtiä käytettiin kahdeksassa näytteessä.

Lieriön muotoiset koekappaleet, joiden korkeus ja leveys olivat 100 mm, valmistettiin ICT-kiertotiivistylaitteella tiiveystavoitteen ollessa $21,5 \text{ kN/m}^3$ (kuivatilavuuspaino). Säilytys tapahtui 100 %:n suhteellisessa kosteudessa huoneenlämmössä. Koekappaleille tehtiin yksiaksiaalinen puristuskoe 28 ja 91 vrk:n säilytysajan jälkeen. Puristuskoe pyrittiin suorittamaan sementtistabilointiohjeen mukaan eli siten, että kuormituksen lisäys oli $2,5 \text{ kN/s}$. Käytännössä puristusnopeus oli tätä suurempi. Koekappaleita oli aina kaksi rinnakkaista kutakin koestusta varten.

6.3.1.2 Variointimateriaalit

Synteettisen humushapon määrän variointi tehtiin siten, että kaikki koekappaleet valmistettiin jyräbetonin ohjekäyrälle (kuva 6) suhteutetusta puhtaasta kalliomurskeesta, jonka hienoaineksen ja humushapon yhteismäärä oli kaikilla humushappopitoisuuksilla 7,0 % koko näytteen massasta. Toisin sanoen lisättäessä humushapon määrää vähennettiin hienoaineksen määrää vastaavasti, jotta kokonaismassa pysyi 7,0 %:ssa. Lisätyt humushappomäärät olivat 0, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.90, 2.0, 2.15, 2.60, 3.0 ja 4.0 % hienoaineksen massasta. Massa suhteutettiin punnitsemalla aina lajite kerrallaan kahden koekappaleen valmistamiseen tarvittava määrä. Muutoin koekappaleet valmistettiin ja koestettiin kohdassa 6.3.1.1 esitetyllä tavalla. Sideaineina käytettiin sementtiaktivoitua masuunihiekkaa ja kuonajauhetta kaikilla humushappopitoisuuksilla ja sementtiaktivoitua valssimurskattua granulia humushappopitoisuuksilla 0, 1.0, 2.0, 3.0 ja 4.0 %.

Hienoaineksen määrän varioinnissa stabiloitavat massat suhteitettiin punnitsemalla aina lajite kerrallaan kahden koekappaleen valmistamiseen tarvittava määrä. Runkoaineena oli puhdas kalliomurske, joka pestiin ennen suhteutusta. Tällä varmistettiin se, että hienoainesta saatiin varmasti oikea määrä eikä sitä ollut karkeampien rakeiden pinnalla. Varioitavat hienoainesmäärät olivat 0, 6, 12, 18 ja 24 % (kuva 6). Muutoin koekappaleet valmistettiin ja koestettiin kohdassa 6.3.1.1 esitetyllä tavalla. Sideaineina käytettiin sementtiaktivoitua masuunihiekkaa, kuonajauhetta ja valssimurskattua granulia.



Kuva 6: Jyräbetonin ohjekäyrä ja hienoaineksen määrän variaatioissa käytetyt rakeisuudet.

Osa vanhoista tiemateriaaleista suhteitettiin jyräbetonin ohjekäyrälle (kuva 6). Tällä tavalla materiaaleista saatiin eliminoidua rakeisuuseroista johtuvat poikkeamat lujuuksissa. Stabiloitavat massat suhteitettiin punnitsemalla aina lajite kerrallaan kahden koekappaleen valmistamiseen tarvittava määrä. Muutoin koekappaleet valmistettiin ja koestettiin kohdassa 6.3.1.1 esitetyllä tavalla ja sideaineina käytettiin sementtiaktivoitua masuunihiekkaa ja kuonajauhetta.

6.3.2 Puristuslujuudet

6.3.2.1 Lujuustarkastelun jaottelu

Saavutettuja puristuslujuuksia tarkastellaan masuunihiekalle ja kuonajauheelle erikseen, koska ne ovat sideaineina luonteeltaan erilaisia ja kummankin sideaineen käyttötarkoitus poikkeaa hieman toisistaan. Masuunihiekkaa käytetään sekä rakeisuuden korjaajana että sideaineena, kun taas kuonajauhe on yksinomaan sideaine. Masuunihiekan käytöllä ei tavoitella suuria puristuslujuuksia, vaan lähinnä löyhähköä puolijäykkää rakennetta. Osaltaan tähän vaikuttaa masuunihiekan kyky reagoida ja lujittua uudelleen rakenteen murruttua. Kuonajauheella pyritään yleensä sementtistabilointiohjeen mukaisiin lujuuksiin ja rakenteisiin.

Vertailusideaineiden tarkastelu tehdään siten, että valssimurskattua granulia verrataan masuunihiekkaan ja sementtiä kuonajauheeseen. Tämä sen vuoksi, että valssimurskattu granuli toimii hyvin pitkälle masuunihiekan tavoin ollen sitä kuitenkin reaktiivisempaa. Sementti puolestaan on kuonajauheen kaltainen sideaine. Sementin reaktiot ovat kuonajauhetta nopeampia, joten tässä tutkimuksessa valitut koestusiät (28 ja 91 vrk) saattavat vanhoilla tiemateriaaleilla olla kuonajauheelle epäedullisia. Esimerkiksi 6 kk:n säilytyksen jälkeen tapahtuva koestus olisi saattanut ainakin joillakin vertailumateriaaleilla kääntyä kuonajauheen eduksi.

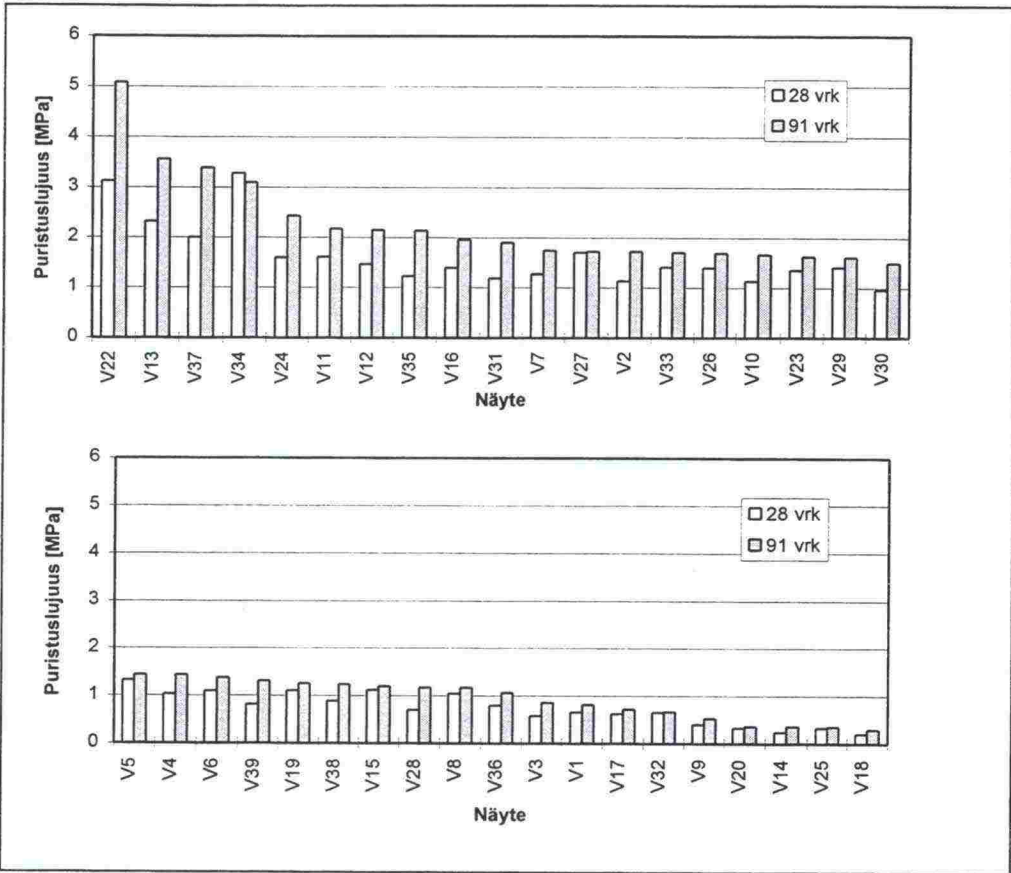
6.3.2.2 Sementtiaktivoitu masuunihiekka

Sementtiaktivoidulla masuunihiekalla stabiloitujen vanhojen tiemateriaalien puristulujuuksissa on huomattavan paljon hajontaa eri näytteiden välillä (kuva 7). Paras 91 vrk:n puristuslujuuden arvo oli 5,08 MPa ja huonoin 0,29 MPa. Vastaavat arvot 28 vrk:n koestusiässä olivat 3,28 MPa ja 0,20 MPa. Suuret erot ovat selvä osoitus siitä, että stabiloitavien materiaalien välillä on huomattavia eroja.

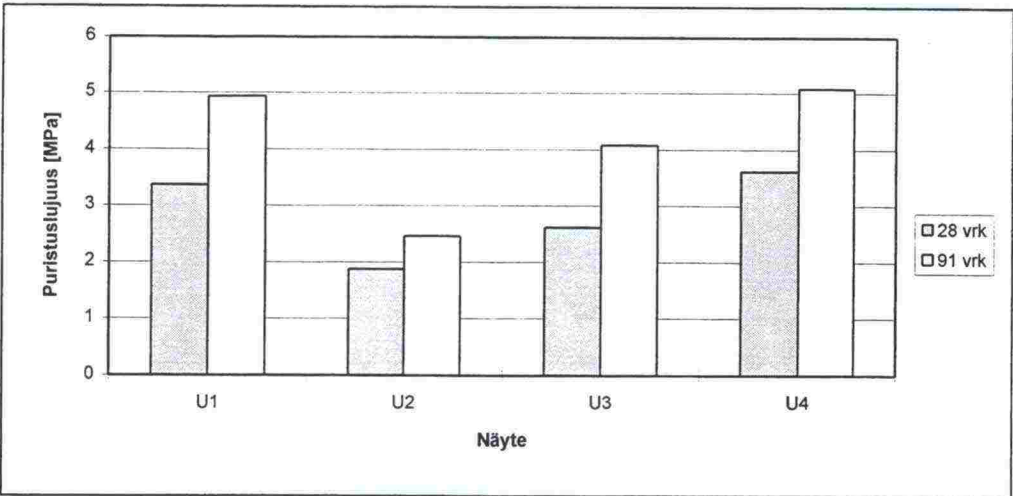
Neljän näytteen 91 vrk:n puristuslujuudet olivat yli 3,0 MPa. Tämä tarkoittaa sitä, että valittu sideaineresepti on lujittamisen kannalta huonohko. Toisaalta liian lujilla koekappaleilla ei lujuuteen vaikuttavien tekijöiden vaikutus olisi tullut niin hyvin esille. On huomattava, että masuunihiekan lujittuminen on hidas prosessi varsinkin, kun aktivaattoria on niinkin vähän kuin 1,0 %. Pitemmällä koestusiällä lujuudet olisivat todennäköisesti vielä parantuneet.

Huonosti lujittuvien materiaalien kohdalla näyttäisi siltä, että lujittumista ei tapahdu juuri laisinkaan, kun verrataan 28 ja 91 vrk:n puristuslujuuksia. Yli puolella näytteistä 91 vrk:n puristuslujuudet olivat 1-2 MPa. Lujuuden kehitys 28:sta vrk:sta 91 vrk:een vaihteli huomattavasti eri näytteiden välillä. Parhaimmillaan 91 vrk:n lujuus oli 1,74-kertainen 28 vrk:n lujuuteen verrattuna. Joillakin näytteillä lujuus ei enää lisääntynyt 28 vrk:n säilytysajan jälkeen.

Uusilla kalliomurskeilla sementtiaktivoidulla masuunihiekalla kahden näytteen (U1 ja U4) 91 vrk:n puristuslujuudet olivat noin 5 MPa ja näytteellä U3 noin 4 MPa (kuva 8). Sen sijaan valmiiksi jyräbetonin ohjekäyrälle suhteitettulla U2:lla 91 vrk:n lujuus oli noin 2,5 MPa. Heikkoon lujuuteen vaikuttaa osaksi rakeiden pinnan tasaisuus. U2 oli selvästi muita uusia murskeita siläpintaisempi. Lujuustarkastelussa tällä on vaikutusta, koska rosoisen pinnan ja sideaineen välinen tartunta on luonnollisesti sileää huomattavasti parempi. Masuunihiekan särmikkäästä raemuodosta johtuen jo pelkkä rakeiden välinen kitka lisää lujuutta karkeilla murskeilla.



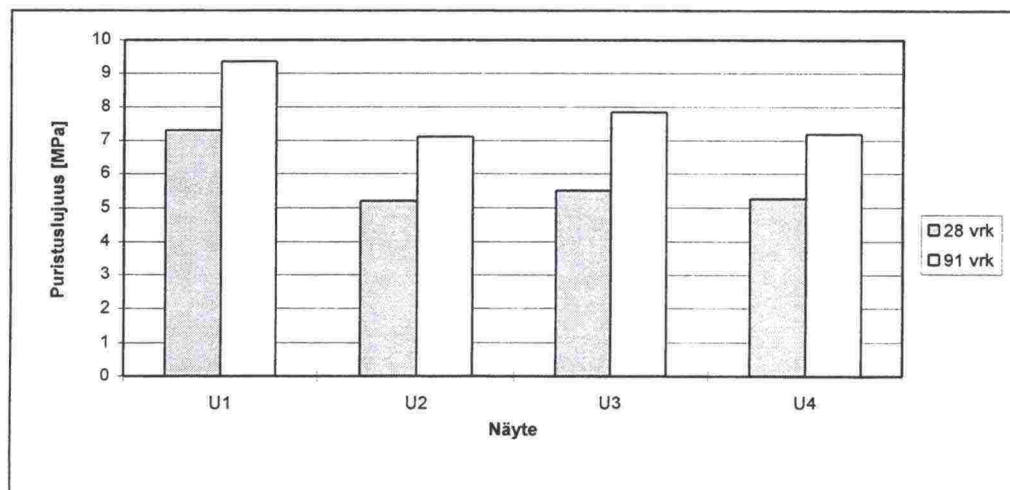
Kuva 7: Sementtiaktivoidulla masuunihiekalla stabiloitujen vanhojen tiemateriaalien puristuslujuudet.



Kuva 8: Sementtiaktivoidulla masuunihiekalla stabiloitujen uusien kalliomurskeiden puristuslujuudet

6.3.2.3 Sementtiaktivoitu kuonajauhe

Sementtiaktivoidulla kuonajauheella saavutettiin sideaineen reaktiivisuudesta johtuen masuunihiekkaa paremmat lujuudet. Uusilla kalliomurskeilla paras 91 vrk:n puristuslujuus oli noin 9,5 MPa (näyte U1) ja heikoin hieman yli 7 MPa (näytteet U2 ja U4). Huonoiten lujittuneiden näytteiden 28 vrk:n lujuudetkin olivat hieman yli 5 MPa. Lujuuden kehitys 28:sta 91:een vuorokaudteen oli keskimäärin 1,36-kertainen hajonnan ollessa 0,08. Puristuslujuudet on esitetty kuvassa 9.

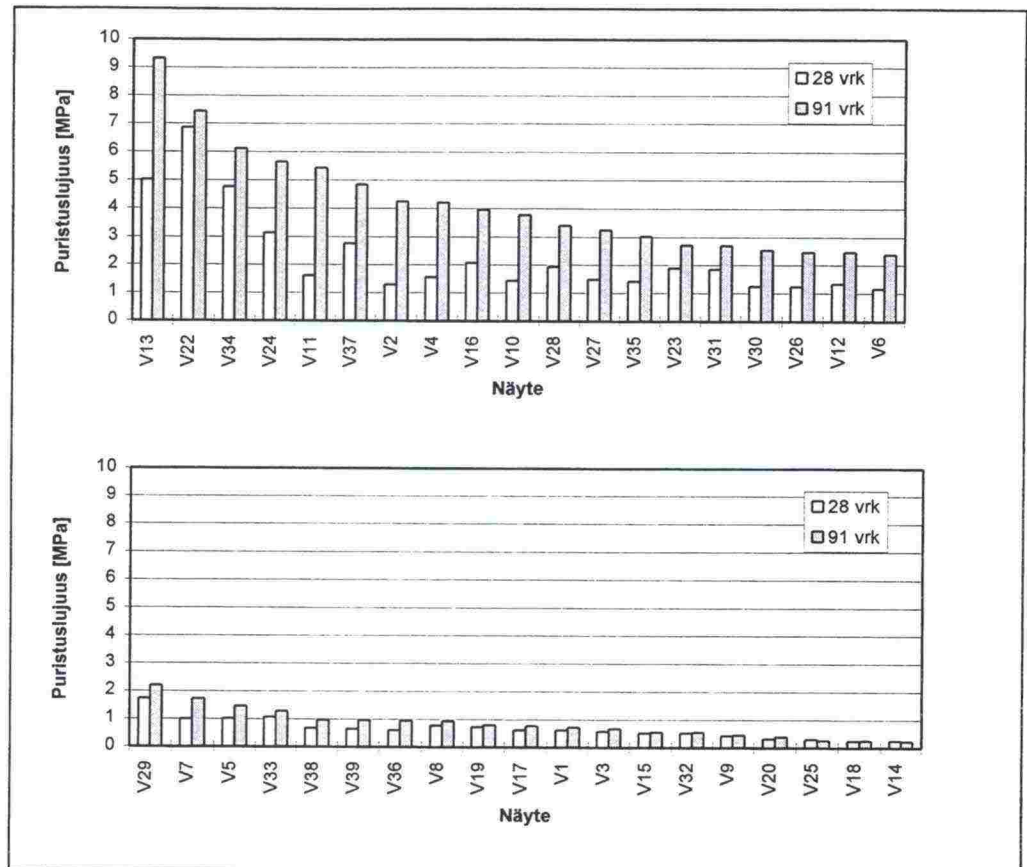


Kuva 9: Sementtiaktivoidulla kuonajauheella stabiloitujen uusien kalliomurskeiden puristuslujuudet

Suurin 91 vrk:n puristuslujuus vanhoilla tiemateriaaleilla oli sementtiaktivoidulla kuonajauheella stabiloitaessa peräti 9,32 MPa, kun taas heikoin ainoastaan 0,22 MPa (kuva 10). Vastaavat arvot 28 vrk:n koestuksille olivat 6,86 MPa ja 0,22 MPa. Erot varsinkin 91 vrk:n lujuuksissa ovat huomattavan suuret.

Vaikka paras lujuus olikin huomattavan korkea, ei yli 5 MPa:n lujuuksia ollut 91 vrk:n säilytysajan jälkeen kuin viidellä näytteellä. Lujuuteen vaikuttavien tekijöiden tutkimisen kannalta 91 vrk:n lujuus oli monella näytteellä kuitenkin niin suuri, että tarkastelu oli suoritettava 28 vrk:n puristuslujuuksien perusteella. Lähes puolella näytteistä puristuslujuus oli alle 1 MPa.

Lujuuden kehitys sementtiaktivoidulla kuonajauheella stabiloiduilla näytteillä 28 vuorokaudesta 91 vrk:een oli parhaimmillaan 3,39-kertainen. Huonosti lujittuvilla lujuuskehitystä ei tapahtunut käytännössä laisinkaan 28 ja 91 vrk:n välillä. Tämän perusteella voi olettaa, että sideaine ei ollut reagoinut juuri laisinkaan.

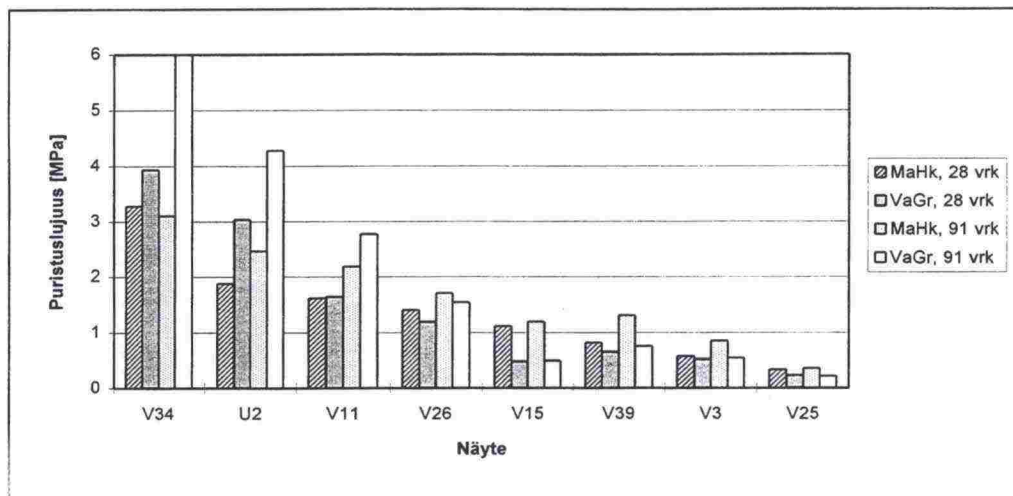


Kuva 10: Sementtiaktiivoidulla kuonajauheella stabiloitujen vanhojen tiemateriaalien puristuslujuudet.

6.3.2.4 Vertailusideaineet

Vertailusideaineita käytettiin seitsemällä vanhalla tiemateriaalilla ja yhdellä uudella kalliomurskeella. Sementtiaktiivoidun masuunihiekan vertailusideaineena toimineen valssimurskatun granulin sideaineresepti valittiin siten, että sementtiaktivaattorin määrä pysyi samana kuin masuunihiekalla, mutta valssimurskatun granulin määrä oli puolet masuunihiekan määrästä.

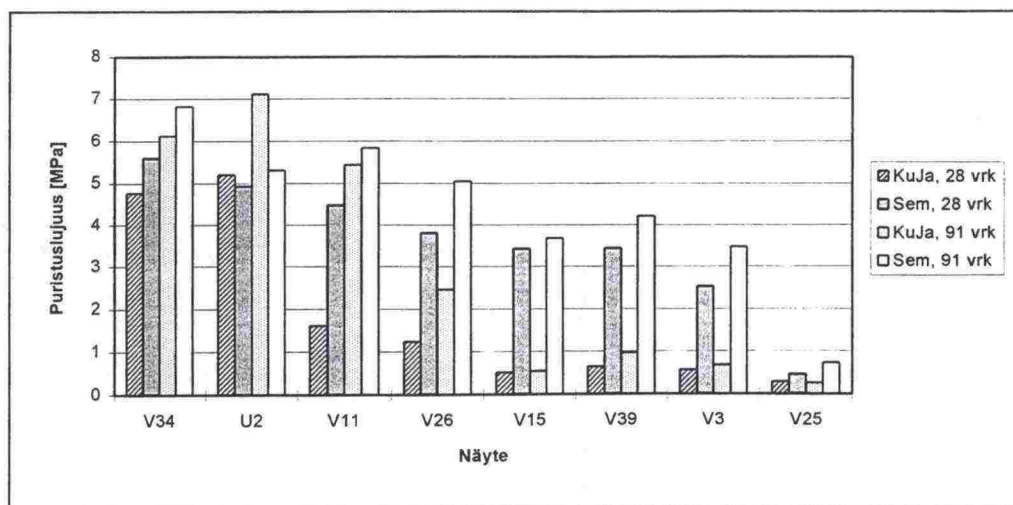
Pienemmästä sideainemäärästä huolimatta sementtiaktiivoidulla valssimurskatulla granuliilla saavutettiin kolmella näytteellä paremmat puristuslujuudet kuin sementtiaktiivoidulla masuunihiekalla (kuva 11). Muidenkaan näytteiden kohdalla valssimurskattu granuli ei ollut merkittävästi heikompi. On huomattava, että näytteillä V11 ja V34, joilla valssimurskattu granuli oli parempi, on humuspitoisuus myös pienin. Valssimurskattu granuli toimi paremmin myös puhtaalla kalliomurskeella. Tämä johtuu osittain siitä, että valssimurskatulla granuliilla sementtiaktivaattorin suhteellinen osuus koko sideainemäärästä oli suurempi kuin masuunihiekalla. Tällöin se on toiminut tehokkaammin vähäisen humusmäärän haittavaikutusten eliminoijana ja kuonareaktion aktivoijana. Tulosten perusteella näyttäisi siltä, että kun valssimurskattua granulia käytetään keskimäärin puolet masuunihiekan määrästä, saavutetaan samaa suuruusluokkaa olevia puristuslujuuksia.



Kuva 11: Sementtiaktivoidulla masuunihiekalla ja valssimurskatulla granulilla stabiloitujen näytteiden puristuslujuudet.

Sementtiaktivoidulla kuonajauheella ja vertailusideaineena olleella Yleissementillä sideainepitoisuus oli sama. Sementtiaktivoidulla kuonajauheella saavutettiin puhtaalla kalliomurskeella paremmat puristuslujuudet kuin pelkällä sementillä (kuva 12). Lisäksi vähiten humusta sisältävillä näytteillä V11 ja V34 lujuudet olivat samaa suuruusluokkaa, joskin hieman heikommät kuin sementillä. Muiden näytteiden kohdalla kuonajauheella saatiin huomattavasti heikompia lujuuksia kuin sementillä. Poikkeuksena oli näyte V25, jossa oli hienoaineksessa humusta 3,61 %. Se ei lujittunut myöskään Yleissementillä.

Näiden tulosten perusteella näyttäisi siltä, että kuonajauhe on sementtiä herkempi epäpuhtauksille, käytännössä humusaineille. Kuonajauheella aktivaattorina toiminut sementti ei siten riittänyt sekä aktivoimaan kuonareaktiota että eliminoimaan humuksen haittavaikutuksia.



Kuva 12: Sementtiaktivoidulla kuonajauheella ja Yleissementillä stabiloitujen näytteiden puristuslujuudet.

6.3.2.5 Variointimateriaalit

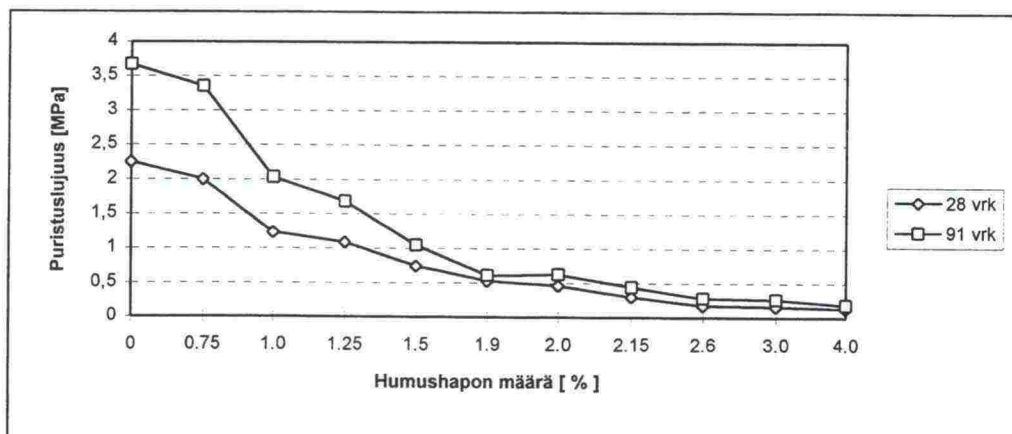
Humushapon määrän variointi

Humushapon määrän lisäyksellä on lähes suoraviivainen vaikutus lujuuden heikkenemiseen kaikilla kolmella kuonasideaineella (kuvat 13, 14 ja 15). Humushappomäärän ollessa noin 2,0 % on sekä kuonajauheen että valssimurskatun granulin tapauksessa puristuslujuudet suuruusluokkaa 0,5 MPa. Sementtiaktivoitu masuunihiekka näyttäisi olevan hieman vastustuskykyisempi humushapon haittavaikutusta vastaan. Sen puristuslujuus on noin 0,5 MPa, kun humushapon määrä on 2,15 %.

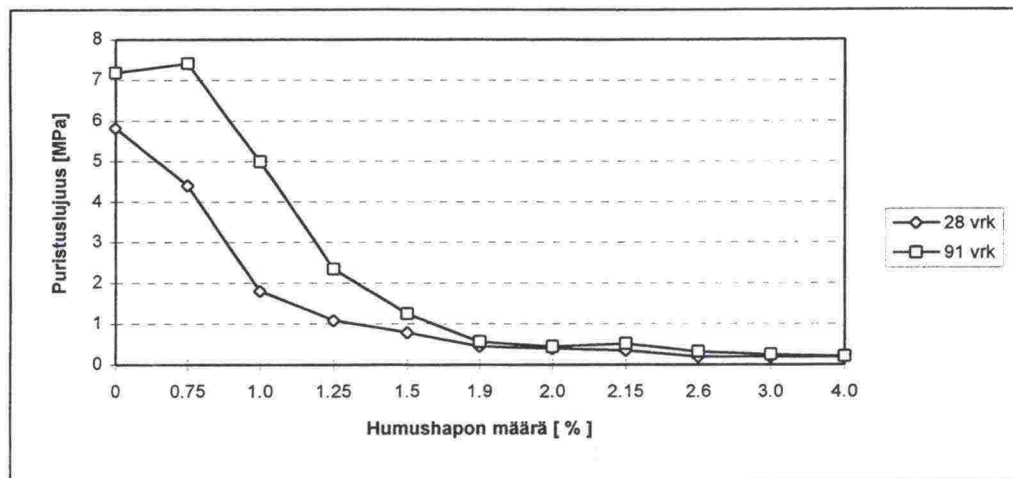
Luonnon humushapon määrä oli tässä tutkimuksessa enimmillään 1,17 %. Synteettisen humushapon määrän varioinnissa kuitenkin tarvittiin keskimäärin 2,0 % humushappoa ennen kuin sideainereaktion voi katsoa suunnilleen kokonaan estyneen. Tämän perusteella näyttäisi siltä, että vanhoissa tiemateriaaleissa humushapon pieni määrä ei yksin riitä kokonaan estämään sideainereaktiota. Tosin on muistettava, että synteettinen humushappo poikkeaa hieman luonnon humushaposta.

Hienoaineksen määrän variointi

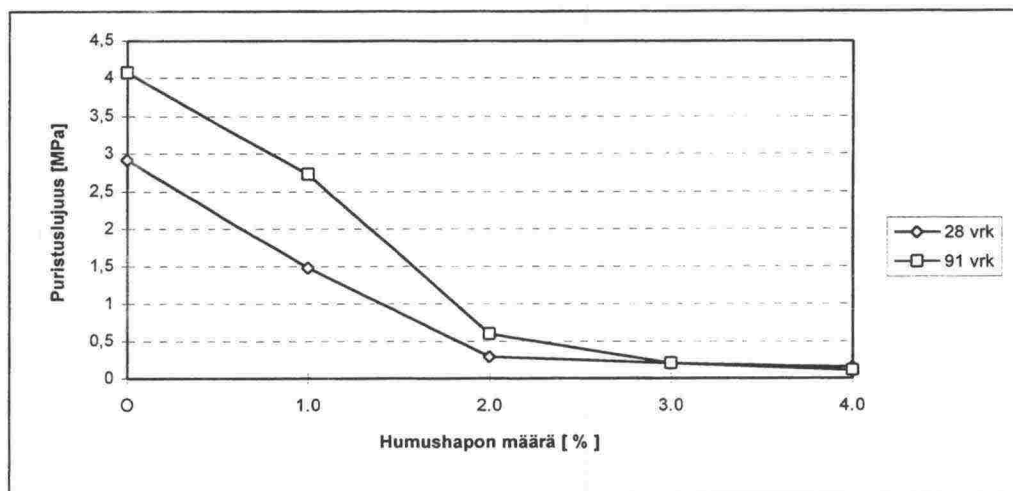
Hienoaineksen määrällä on yllättävän vähän vaikutusta sekä 28 että 91 vuorokauden puristuslujuuksiin (kuvat 16, 17 ja 18). Hienoainesmäärillä 12, 18 ja 24 % sementtiaktivoidulla masuunihiekalla 28 vrk:n puristuslujuus oli suuruusluokkaa 2,75 MPa ja 91 vrk:n puristuslujuus noin 3,9 MPa. Vastaavat arvot sementtiaktivoidulla kuonajauheella stabiloiduille näytteille olivat keskimäärin 5,6 MPa ja 8,3 MPa sekä sementtiaktivoidulla valssimurskatulla granulilla noin 3,3 MPa ja 4,6 MPa. Valssimurskatulla granulilla lujuus oli hieman nousujohteinen hienoaineksen määrän kasvaessa.



Kuva 13: Humushapon määrän varioinnissa sementtiaktivoidulla masuunihiekalla stabiloitujen näytteiden puristuslujuudet.

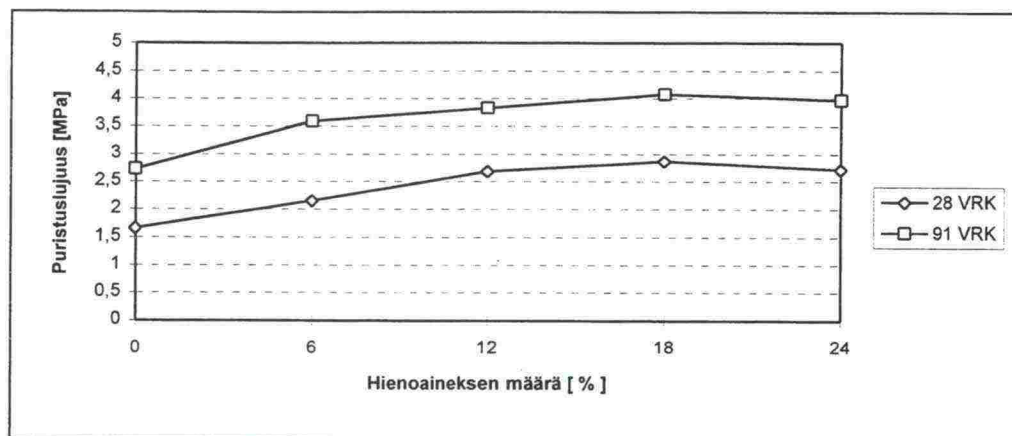


Kuva 14: Humushapon määrän varioinnissa sementtiaktivoidulla kuonajauheella stabiloitujen näytteiden puristuslujuudet.

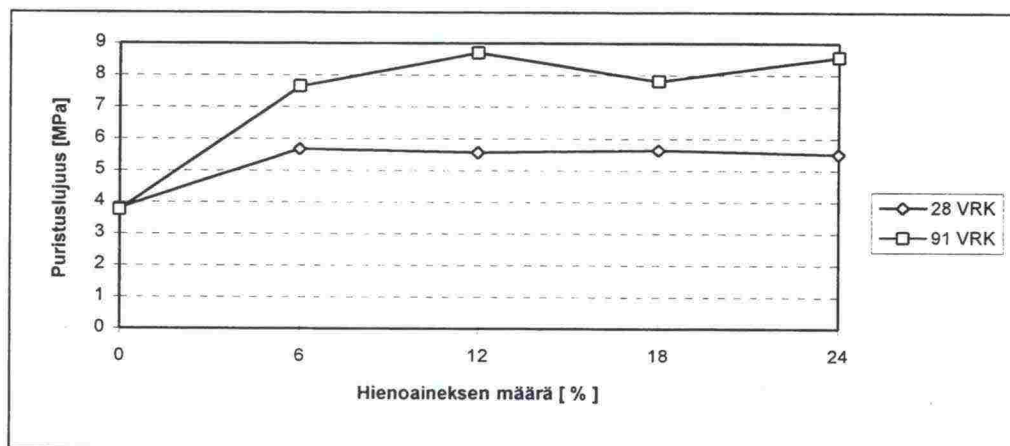


Kuva 15: Humushapon määrän varioinnissa sementtiaktivoidulla valssimurskatulla granulilla stabiloitujen näytteiden puristuslujuudet.

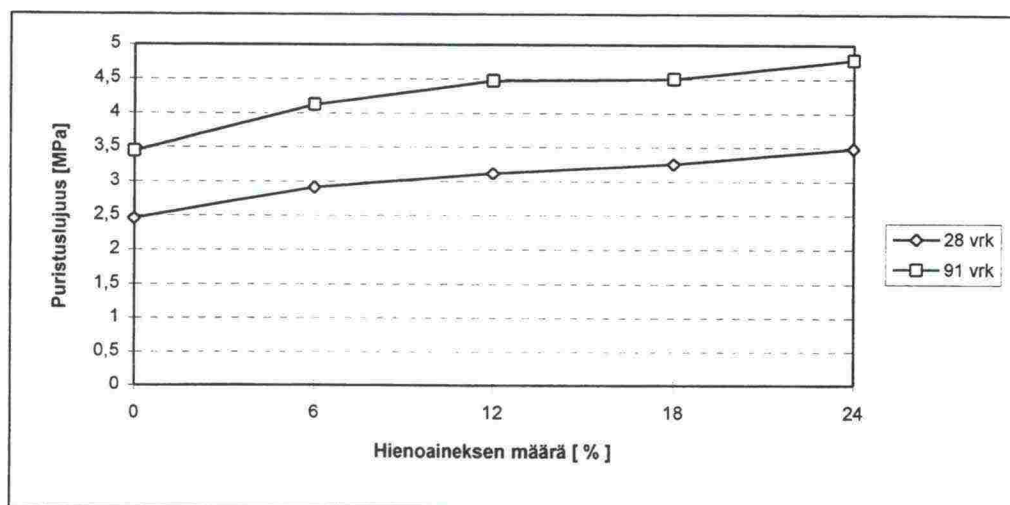
Hienoainesmäärän ollessa 6 % olivat lujuudet hieman heikompia. Massoilla, joissa hienoainesta ei ollut lainkaan, olivat lujuudet kaikilla sideaineilla heikompia. Tällöin stabiloitavassa massassa ei ole lainkaan hienoa ainesta, joka voisi täyttää tyhjätiloja. Seurauksena on paljon tyhjätilaa sisältävä massa, jonka lujuus on heikempi. Näytteitä valmistettaessa tämä tuli hyvin ilmi, koska koekappaleita oli vaikea saada pysymään ehjänä.



Kuva 16: Hienoaineksen määrän varioinnissa sementtiaktivoidulla masuunihiekalla stabiloitujen näytteiden puristuslujuudet.



Kuva 17: Hienoaineksen määrän varioinnissa sementtiaktivoidulla kuonajauheella stabiloitujen näytteiden puristuslujuudet.



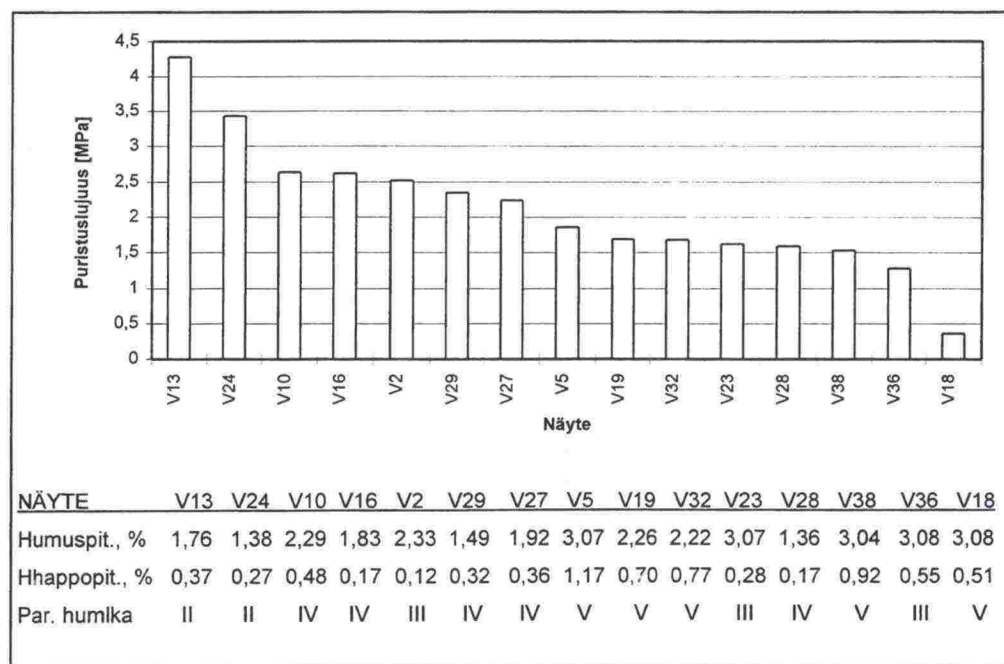
Kuva 18: Hienoaineksen määrän varioinnissa sementtiaktivoidulla valssimurskalla granulilla stabiloitujen näytteiden puristuslujuudet.

Samalle rakeisuudelle suhteutetut vanhat tiemateriaalit

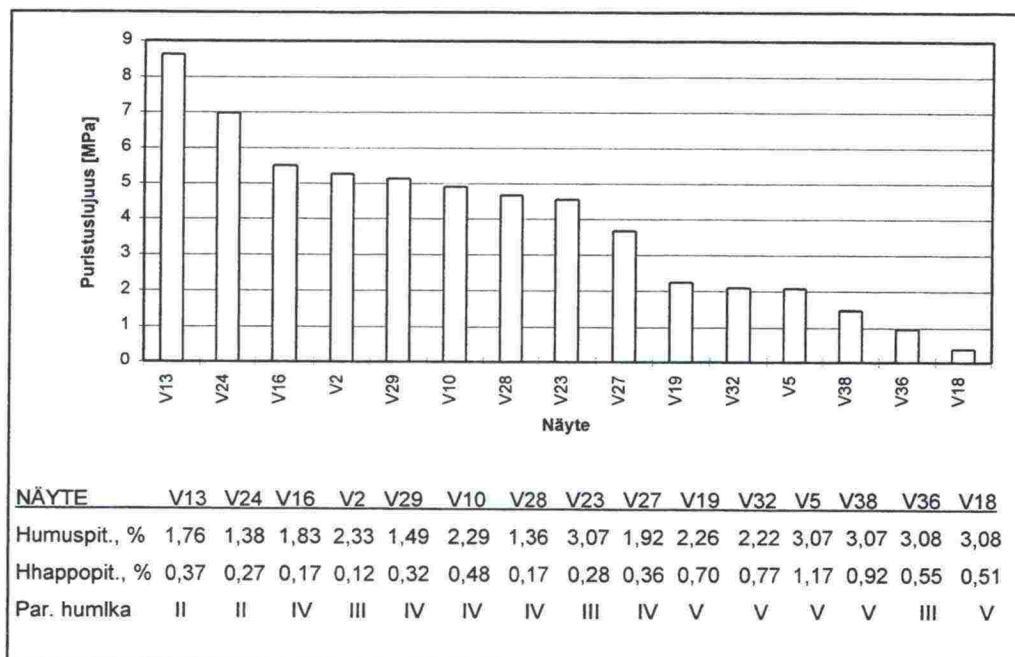
Samalle rakeisuudelle suhteutetuilla vanhoilla tiemateriaaleilla puristuslujuudet olivat sekä sementtiaktivoidulla masuunihiekalla että kuonajauheella suurempia kuin suhteittamattomasta materiaalista valmistetuilla koekappaleilla (kuvat 19 ja 20). Tämä johtuu pääsääntöisesti siitä, että raekokojakauma on lujuustarkastelun kannalta edullisempi suhteutetuilla materiaaleilla.

Polttomenetelmällä määritetyn humuksen eli käytännössä orgaanisen aineksen määrän vaikutus näkyy hyvin varsinkin huonoimmin lujittuneiden näytteiden osalta. Huonoimmat lujuudet tulevat koekappaleilla, joiden runkoaineuksessa on eniten humusta. Tosin sementtiaktivoidulla kuonajauheella näyte V23 lujittuu keskinertaisesti, vaikka sen hienoaineksen humuspitoisuus on 3,07 %. Sementtiaktivoidulla masuunihiekalla näyte V28 puolestaan lujittuu huonosti, vaikka sen hienoaineksen humuspitoisuus on vain 1,36 %.

Humushappopitoisuudella on keskimäärin lujuutta heikentävä vaikutus. Näyttäisi siltä, että sementtiaktivoitu kuonajauhe on herkempi humushapon lujuutta heikentävälle vaikutukselle kuin sementtiaktivoitu masuunihiekka. On kuitenkin huomattava, että raja-arvo, jonka jälkeen lujittumista ei stabiloida enää tapahdu, on kummallakin sideaineella suunnilleen sama. Kuonajauheella lujuuden menetys on suurempi, koska se puhtaammilla materiaaleilla lujittaa masuunihiekkaa paremmin.



Kuva 19: Samalle rakeisuudelle suhteitetuilla vanhoilla tiemateriaaleilla sementtiaktivoidulla masuunihiekalla stabiloitujen näytteiden 91 vrk:n puristuslujuudet.



Kuva 20: Samalle rakeisuudelle suhteitetuilla vanhoilla tiemateriaaleilla sementtiaktivoitulla kuonajauheella stabiloitujen näytteiden 91 vrk:n puristuslujuudet.

Myös parannetun humusluokan kohdalla kuonajauheella heikoimmat lujuudet ovat luokkaa V lukuunottamatta näytettä V36. Masuunihiekalla parannetun humusluokan ja lujuuden välinen vuorovaikutus ei ole näin selvä. Kummallakin sideaineella parhaimman lujuuden saavuttaneet näytteet V13 ja V24 kuuluvat humusluokkaan II.

6.3.3 Lujuuteen vaikuttavat tekijät

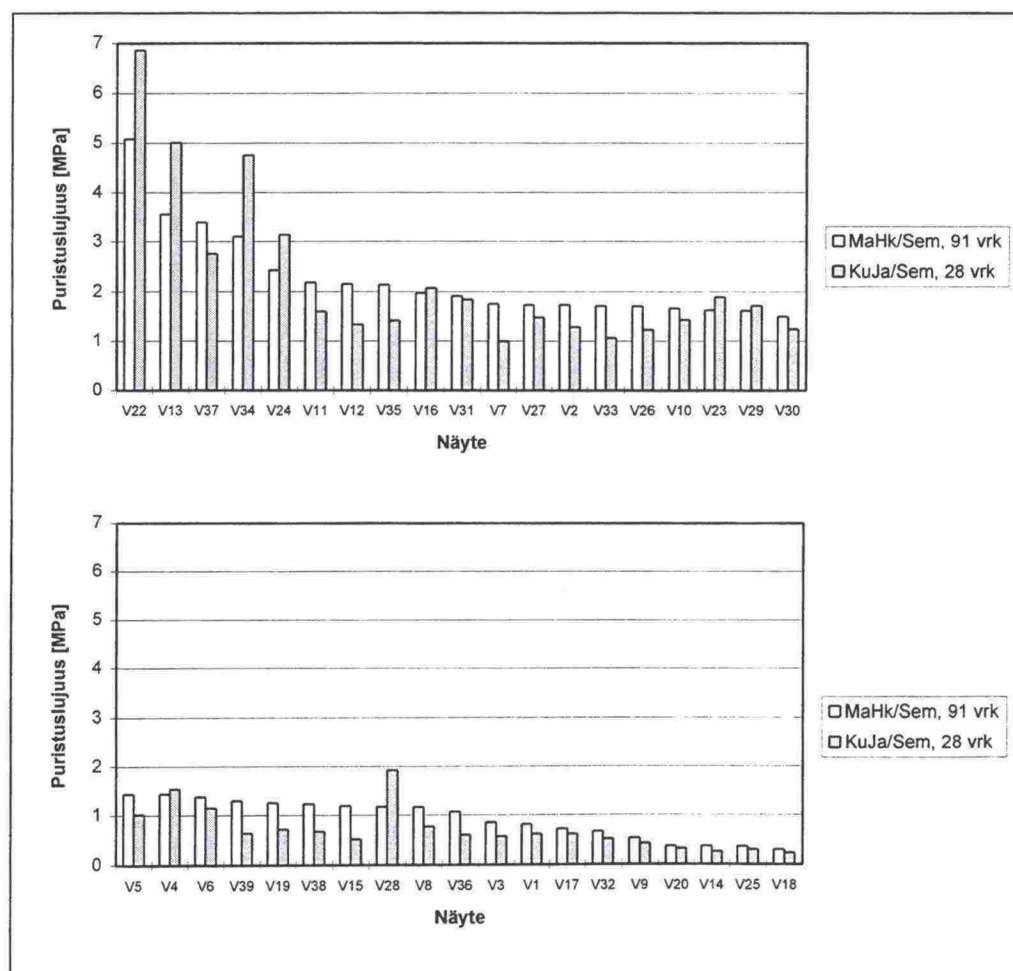
6.3.3.1 Tarkastelun perusteet

Lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ja näitä kuvaavia tunnuslukuja on arvioitu sementtiaktivoitulla masuunihiekalla 91 vrk:n puristuslujuustuloksiin perustuen ja sementtiaktivoitulla kuonajauheella vastaavasti 28 vrk:n tuloksiin perustuen. Kuonajauheella 91 vrk:n lujuudet olivat masuunihiekkaa suuremmat ja lujittumista oli tapahtunut niin paljon, että eri tekijöiden vaikutus ei ollut enää selvästi havaittavissa. Lisäksi sementtiaktivoitulla masuunihiekalla stabiloitujen näytteiden 91 vrk:n ja kuonajauheella stabiloitujen näytteiden 28 vrk:n lujuudet ovat samaa suuruusluokkaa (kuva 21).

Tutkimuksessa tarkasteltiin seulonnan tuloksena saatuja tekijöitä (27 kpl), rakeisuuskäyristä laskettuja tunnuslukuja (11 kpl), rakeiden muodoista laskettuja tunnuslukuja (3 kpl) sekä orgaanisesta aineksesta ja kemiallisista olosuhteista riippuvia tekijöitä (16 kpl). Tarkasteltavia tekijöitä oli siten kaikkiaan 57 kappaletta. Myös tiiviysasteen vaikutus lujuuteen oli tarkastelun kohteena.

Kaikki tutkituista tekijöistä luonnollisesti vaikuttavat ainakin jossain määrin lujuuteen. Joidenkin tekijöiden vaikutus on lähinnä marginaalinen. Esimerkiksi hienoaineksen raekokojakaumalla ei ole vaikutusta lujuuteen juuri lainkaan. Jotkin tekijät ja tunnusluvut erottuvat selvästi vaikuttaviksi. Monet näistä olivat hienoaineksesta määritettyjä tekijöitä. Suurin osa tarkasteltavista tekijöistä ja tunnusluvuista oli sellaisia, jotka vaikuttavat lujuuteen, mutta varsin vaihtelevasti näytteestä riippuen.

Kuvissa 22-34 näytteet on jaettu neljään luokkaan. Tätä tarkempi jako ei olisi mielekästä, koska mikään yksittäinen vaikuttava tekijä ei erottunut selkeästi hallitsevaksi. Näinkin karkeassa jaossa voivat hajonnat olla kohtalaisen suuria. Lujuuteen vaikuttavien tekijöiden tarkastelu perustuu sekä kuviin 22-34 että tuloksiin perustuvaan lujuuden ja tarkastelun kohteena olevien tekijöiden väliseen riippuvuuteen. Kuvien tärkein anti on siten havainnollistaa, kuinka monta näytettä kunkin vaikuttavan tekijän kohdalla on hyvin, huonosti tai keskinukertaisesti lujittuvia ja mikä on vaikuttavan tekijän keskiarvo tietyllä lujuustasolla.



Kuva 21: Sementtiaktivoidun masuunihiekan 91 vrk:n ja sementtiaktivoidun kuonajauheen 28 vrk:n puristuslujuudet.

Puristuslujuuksista puhuttaessa on huomattava, että puristuslujuudet, jotka ovat suuruusluokkaa 2-3 MPa, ovat tässä tutkimuksessa hyviä ljujuuksia. Tämä on seurausta sideainereseptien valinnasta, joilla ei pyrittykään suurimpaan mahdolliseen ljujuuteen.

Puristuslujuus vaikuttavan tekijän suhteen on laskettu kuvissa ilmoitetun näyttemäärän ljujuuksien keskiarvona. Vaikuttavan tekijän raja-arvot on valittu siten, että ne ovat mahdollisimman tasaisin välein ja että kussakin ryhmässä olisi mahdollisimman tasainen määrä näytteitä. Vaikuttava tekijä puristuslujuuden suhteen (alempi kuva kehyksessä) on puolestaan laskettu siten, että lujimmassa ja heikoimmassa ryhmässä on kummassakin kymmenen näytteen keskiarvo ja keskimmaisissä vastaavasti yhdeksän näytteen. Lujinta ryhmää kutsutaan tässä hyvin lujittuvaksi, kahta keskimmäistä keskinkertaisesti lujittuviksi ja heikointa huonosti lujittuvaksi. Esimerkiksi puristuslujuus 2,79 MPa on saatu siten, että on laskettu kymmenen lujimman näytteen puristuslujuuksien keskiarvo. Tätä ljujuutta vastaava vaikuttavan tekijän arvo on laskettu vastaavien näytteiden keskiarvona.

Tiiviysasteella ei tässä tutkimuksessa valmistetuilla koekappaleilla ollut merkittävää vaikutusta ljujuuteen. Tämä johtuu siitä, että valittu tiiveystavoite oli suhteellisen onnistunut. Tiiviysasteella on kuitenkin vaikutusta varsinkin, jos se on hyvin alhainen ja sitoutumista ei tapahdu juuri laisinkaan. Siksi sideainereseptiikan kehittämisessä olisi pyrittävä vakioituun tiiveyteen. Sähkönjohtokyvyn vaikutus ljujuuteen oli hyvin vähäinen. Myöskään muotoarvojen ja muotoluvun vaikutusta ljujuuteen ei voi pitää merkittävänä.

Uusilla kalliomurskeilla saavutettiin siinä määrin hyviä ljujuuksia, että vaikuttavia tekijöitä niistä on vaikeampi määritellä. Heikommilla ljujuuksilla vaikuttavat tekijät olisivat todennäköisesti samoja kuin vanhoilla tiemateriaaleilla. Orgaanisesta aineksesta aiheutuvia stabilointitulosta heikentäviä vaikutuksia ei luonnollisesti olisi, joten vaikuttavat tekijät riippuisivat sekä raekokoja-kaumasta että itse kiviaineksen laadusta. Uudet kalliomurskeet ovat stabiloinnin kannalta kuitenkin varsin loogisesti käyttäytyviä materiaaleja.

Hyvin keskeinen ljujuuteen vaikuttava tekijä on sideaine. Kuten tässäkin tutkimuksessa on havaittu, on masuunihiekan, valssimurskatun granulin ja kuonajauheenkin välillä huomattavia eroja. Sideainetta valittaessa on tapauskohtaisesti harkittava, mikä parhaiten palvelee tavoiteltavaa lopputulosta. Täysin uudessa, kalliomurskeesta tehdyssä, stabiloidussa rakenteessa on kuonajauhe parhaiten toimiva sideaine varsinkin, kun pyritään suuriin ljujuuksiin ja hyvin jäykkään rakenteeseen. Mikäli korkea ljujuus ja hyvin jäykkä rakenne eivät ole ensisijaisia tavoitteita, vaan halutaan parantaa myös runkoaineen ominaisuuksia, toimii masuunihiekka tällöin parhaiten. Etenkin vanhojen teiden rakennekerrosten stabiloinnissa on sementtiaktivoitu masuunihiekka hyvä sideainevalinta. Valssimurskattu granuli puolestaan on sideaine, jossa ainakin jossain määrin yhdistyvät sekä masuunihiekan rakei-

suus että kuonajauheen reaktiivisuus. Käytön kannalta se soveltunee ilmeisesti parhaiten masuunihiekkastabiloinnin tyyppisiin kohteisiin.

6.3.3.2 Kiviaineksesta riippuvat tekijät

Kiviaineksesta riippuvia tekijöitä ovat seulonnan tuloksena saadut tekijät (27 kpl), rakeisuuskäyristä lasketut tunnusluvut (11 kpl) ja rakeiden muodoista lasketut tunnusluvut (3 kpl). Lujittumiseen vaikuttavat kiviaineksesta riippuvat tekijät on esitetty liitteessä 5.

Rakeisuudesta riippuvista tekijöistä hienoaineksen määrällä on yllättävän vähän vaikutusta lujuuteen. Tämän vahvistaa osaltaan puhtaalle kalliomurskeelle tehty hienoaineksen määrän variointi. Kun hienoainesta on alle 5 %, on tällä lujuutta heikentävä vaikutus. Tällöin ei ole tarpeeksi 'täytefilleriä' ja stabiloidusta massasta tulee heikkoa. Myöskään hienoaineksen raekokoja-kaumalla ei ole merkittävää vaikutusta lujuuteen. Määrällä on vaikutusta, kun tarkastellaan esimerkiksi hienoaineksen humusta. Runsaasti humuspitoista hienoainesta sisältävä materiaali lujittuu huonommin kuin vähän humuspitoista hienoainesta sisältävä edellyttäen tietysti, että hienoainesta ei ole liian vähän. Kun hienoainesta on vähän, niin tällöin humusta on koko massa suhteutettuna myös vähän, mutta hienoaineksen vähäisestä määrästä tulee hallitsevampi tekijä eli tässä tapauksessa lujuutta heikentävä.

Hiekkalajitteen määrän kasvulla on lujuutta heikentävä vaikutus. Soralajitteen määrän lisääntymisellä vaikutus on päinvastainen. Hiekkalajitteen määrän ollessa yli 70 % on heikentävä vaikutus selvä. Kun hiekkalajitetta on 40-70 %, ei lujuus sanottavasti heikkene, koska tällöin soralajitteen määrän kasvu omalta osaltaan lisää lujuutta.

Edellä esitetyn hiekka- ja soralajitteiden määrien vaikutuksesta on seurauksena eri läpäisyprosentteja vastaavien raekokojen ja puristuslujuuden välinen riippuvuus (kuvat 22-25). Sekä masuunihiekalla että kuonajauheella stabiloitaessa läpäisyprosentteja 40 ja 50 vastaavat raekoot ovat hyviä tunnuslukuja, kun arvioidaan saavutettavaa lujuustasoa. Raekoon kasvulla on lujuutta lisäävä vaikutus, koska tällöin myös soralajitteen määrä kasvaa. Vaikutus on keskimäärin tarkasteltuna melko suoraviivainen.

Läpäisy-% 40 vastaavan raekoon d_{40} ollessa keskimäärin alle 0,5 mm saavutetaan huonoja lujuuksia ja raekoon ollessa yli 1,0 mm ovat lujuudet hyviä. Tällä välillä on 23 näytettä, joiden lujuuksia voi luonnehtia keskinkertaisiksi. Näytteitä, joissa d_{40} oli yli 1,0 mm, oli ainoastaan viisi kappaletta. Kun läpäisy-% 50 vastaava raekoko on alle 0,75 mm, on lujuuskin keskimäärin huono. Yli 1,75 mm:n raekoolla on tilanne päinvastoin. Myöskin näytteitä, joissa d_{50} on yli 1,75 mm, oli vähän (6 kpl).

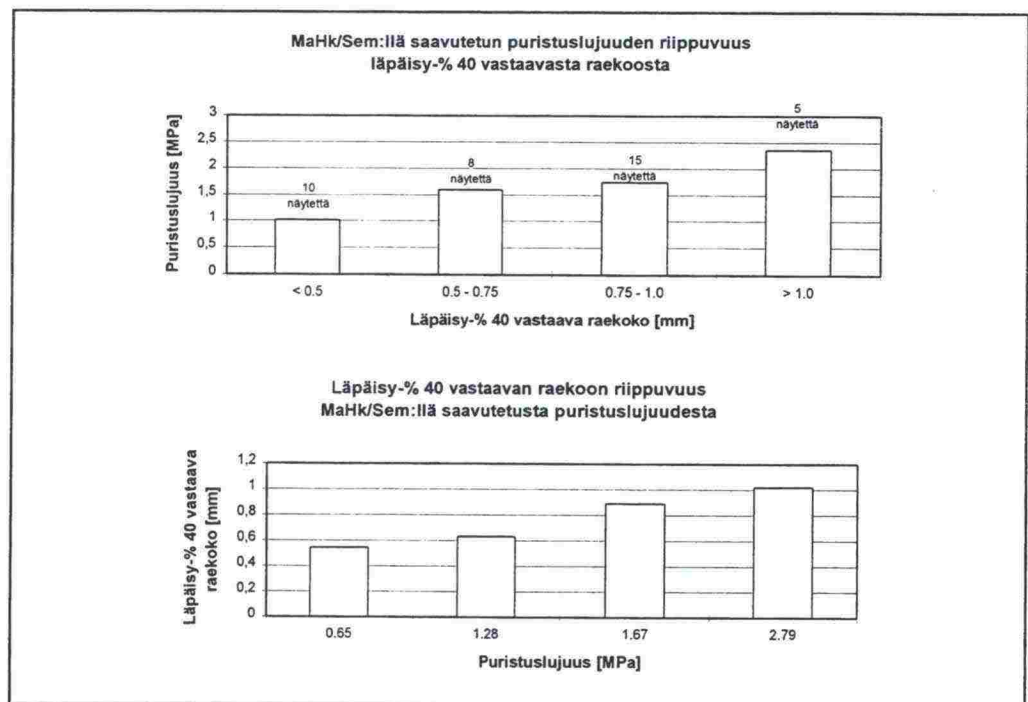
Sementtiaktivoidulla kuonajauheella myöskin läpäisy-% 30 vastaava raekoko d_{30} on hyvä tunnusluku keskimääräisen lujuuskehityksen ennustamises-

sa. Raekoon ollessa alle 0,3 mm ovat lujuudet huonoja ja raekoon ollessa yli 0,5 mm, ovat lujuudet puolestaan hyviä. Tällä välillä on 18 näytettä, joiden lujuudet ovat keskinkertaisia.

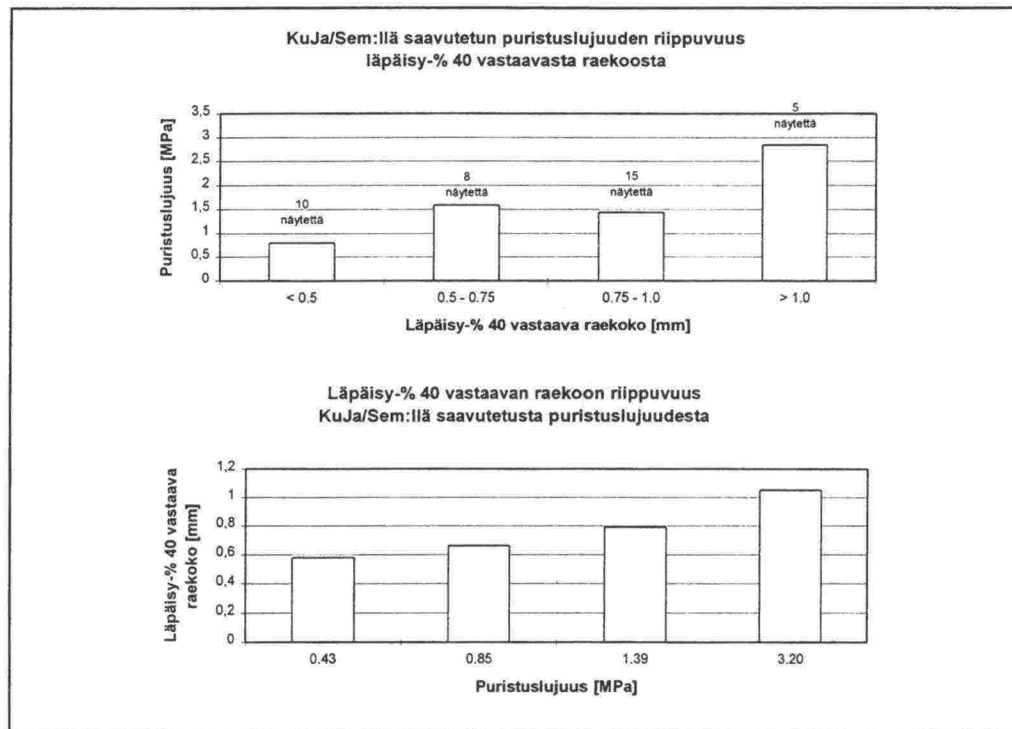
Muista tunnusluvuista läpäisy-% 60 vastaavalla raekoolla d_{60} on jonkin verran vaikutusta, mutta d_{80} :llä vaikutus on jo vähäisempi. Muilla rakeisuuskäyristä lasketuilla tunnusluvuilla ei ole merkittävää vaikutusta keskimääräiseen puristuslujuuteen. Käyrän muodollakaan ei ole olennaista vaikutusta, kunhan edellä mainitut tunnusluvut toteutuvat.

Yllättävän paljon lujuuteen vaikuttaa sementtiaktivoidulla masuunihiekalla 0,25-0,5 mm:n lajitteen määrä. Osaltaan tähän voi vaikuttaa masuunihiekan omakin rakeisuus, koska nimenomaan tämän suuruusluokan lajitetta siinä on paljon. Tällöin heikommilla lujuuksilla rakeiden väliset tartuntakitkat olisivat yksi lujuuteen vaikuttava tekijä.

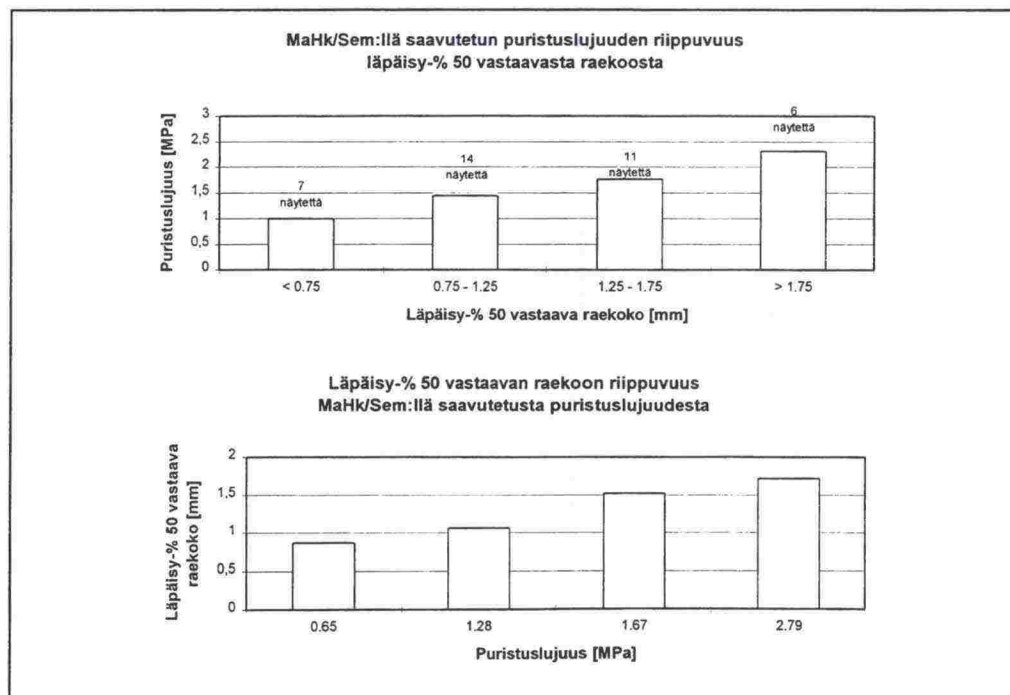
Sementtiaktivoidulla masuunihiekalla jossain määrin vaikuttavia tekijöitä ovat myös 1,0 ja 2,0 mm:n seulan läpäisseen lajitteen määrä ja 4-8 mm:n lajitteen määrä. Kahdella edellisellä määrän kasvulla on lujuutta heikentävä vaikutus ja jälkimmäisellä lujuutta lisäävä vaikutus.



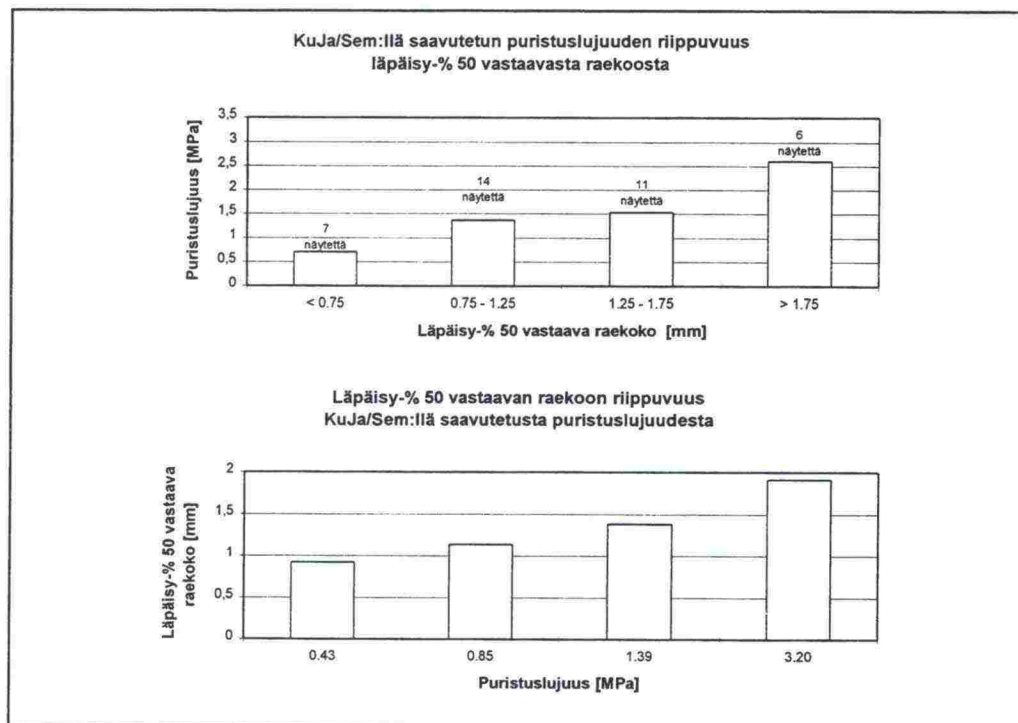
Kuva 22: Sementtiaktivoidulla masuunihiekalla stabiloidun näytteen 91 vrk:n puristuslujuuden ja läpäisy-% 40 vastaavan raekoon välinen keskimääräinen riippuvuus.



Kuva 23: Sementtiaktivoitulla kuonajauheella stabiloidun näytteen 28 vrk:n puristuslujuuden ja läpäisy-% 40 vastaavan raekoon välinen keskimääräinen riippuvuus.



Kuva 24: Sementtiaktivoitulla masuunihiekalla stabiloidun näytteen 91 vrk:n puristuslujuuden ja läpäisy-% 50 vastaavan raekoon välinen keskimääräinen riippuvuus.



Kuva 25: Sementtiaktivoitulla kuonajauheella stabiloidun näytteen 28 vrk:n puristuslujuuden ja läpäisy-% 50 vastaavan raekoon välinen keskimääräinen riippuvuus.

6.3.3.3 Orgaanisesta aineksesta ja kemiallisista olosuhteista riippuvat tekijät

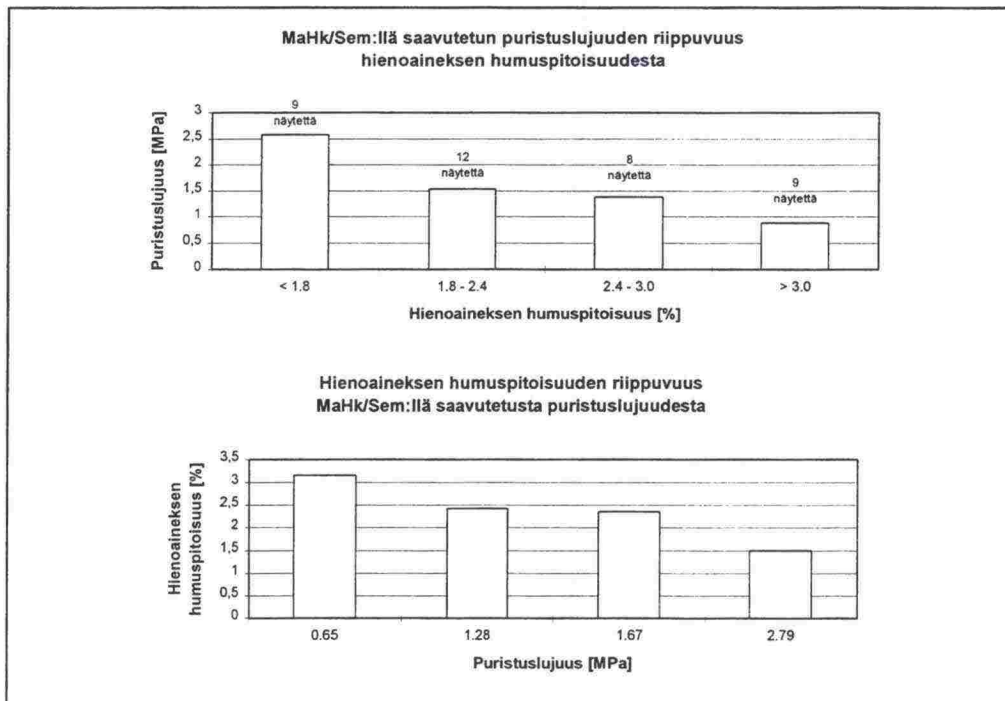
Orgaanisesta aineksesta ja kemiallisista olosuhteista riippuvia tekijöitä oli 16 kpl (liite 5).

Polttamalla määritetyn hienoaineksen humuspitoisuuden eli käytännössä koko orgaanisen aineksen määrän kasvulla on lujuutta heikentävä vaikutus (kuvat 26 ja 27). Stabiloinnin kannalta ongelmattomimpaan ryhmään (hienoaineksessa humusta alle 1,8 %) kuului 9 näytettä. Vaikeimpaan ryhmään, jonka humuspitoisuus on yli 3,0 %, kuului samoin 9 näytettä.

Tulosten mukaan näyttäisi siltä, että sementtiaktivoitu kuonajauhe on masuunihiekkaa herkempi humuksen haittavaikutuksille. Tämä johtuu osittain siitä, että kuonajauheen sideainemäärä on massana pienempi kuin masuunihiekan. Lisäksi kuonajauheen huomattavasti hienompi rakeisuus tekee sen herkemäksi humuksen haittavaikutuksille. Masuunihiekalla vaikuttaa lujuutta lisäävästi paljon humusta sisältävillä materiaaleilla aiemminkin mainittu rakeiden särmikäs muoto. Kun humus estää sideainereaktion, vaikuttaa rakeiden välinen kitka materiaalin lujuuteen.

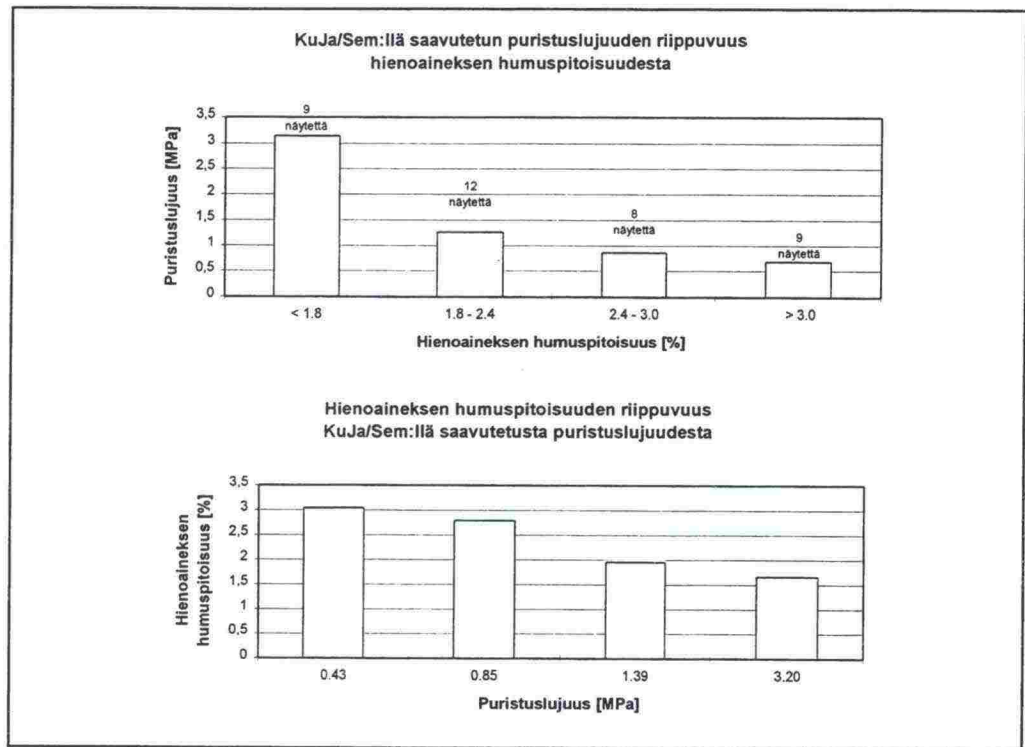
Humuksen vaikutus on selvä erityisesti paljon humusta sisältävillä materiaaleilla. Tämän vahvistaa osaltaan humuspitoisuudeltaan erilaisten vanhojen tiemateriaalien suhteitus samalle rakeisuudelle. Humuksen haittavaikutusten

kannalta ongelmallisimpaan ryhmään kuuluvat näytteet, joiden hienoaineksen humuspitoisuus on välillä 1,8 - 3,0 %. Näitä näytteitä oli 20 kappaletta. Tällaisilla materiaaleilla joidenkin kohdalla tapahtuu lujittumista kohtalaisesti ja joidenkin kohdalla tuskin lainkaan. Ainoastaan kahdella vanhalla tiemateriaalilla hienoaineksen humuspitoisuus oli alle 1,0 %. Koska 29 näytettä sisälsi humusta enemmän kuin 1,8 %, voidaan todeta, että hyvin monien stabiloitavien vanhojen tiemateriaalien kohdalla on odotettavissa ongelmia humuksen haittavaikutusten hallinnassa.



Kuva 26: Sementtiaktivoitulla masuunihiekalla stabiloidun näytteen 91 vrk:n puristuslujuuden ja hienoaineksen humuspitoisuuden välinen keskimääräinen riippuvuus.

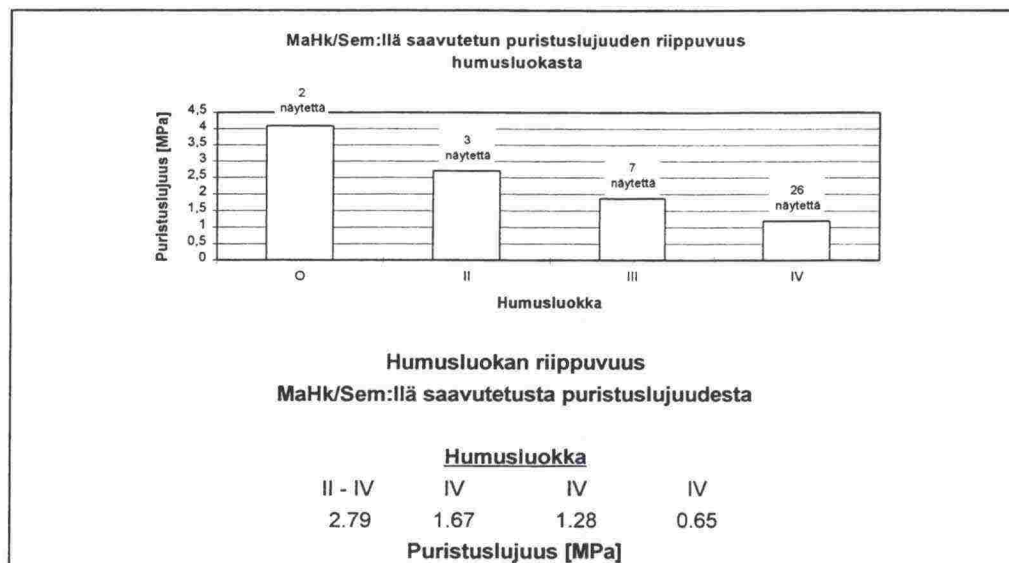
Hienoaineksen humushappopitoisuuden kasvu heikentää myös lujuutta. Vaikutus ei kuitenkaan ole yhtä voimakas kuin koko humuspitoisuuden. Tämän vahvistaa myös osaltaan synteettisen humushapon määrän variointi. Humushapon pienempi vaikutus lujuuteen on tietysti seurausta siitä, että se on vain yksi humuksen komponentti, joka vaikuttaa lujuuteen. Tosin näyttää siltä, että vaikka hienoaineksen humuksessa on muitakin vaikuttavia komponentteja kuin humushappo, ne eivät kuitenkaan vaikuta niin voimakkaasti. Humushapon määrän lisääntymisellä on keskimäärin melko suoraviivainen vaikutus lujuuden heikkenemiseen.



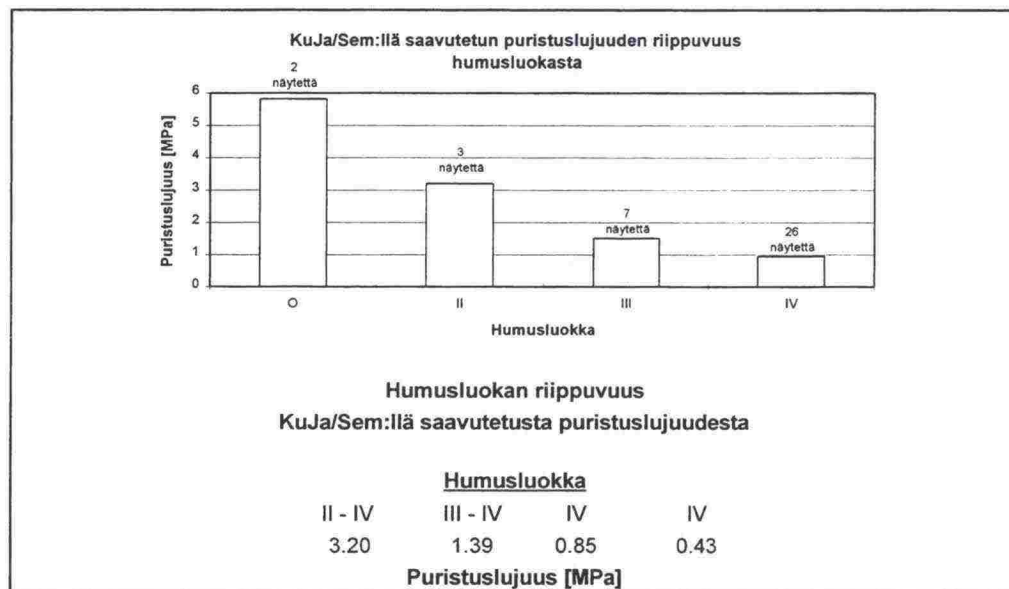
Kuva 27: Sementtiaktivoitulla kuonajauheella stabiloidun näytteen 28 vrk:n puristuslujuuden ja hienoaineksen humuspitoisuuden välinen keskimääräinen riippuvuus.

Parhaiten saavutettavaa lujuustasoa selittävä tekijä on NaOH - kokeella määritettävä humusluokka (kuvat 28 ja 29). Kuitenkin on huomattava, että peräti 26 näytettä kuului humusluokkaan IV. Tällä tavalla tarkasteltuna nykyinen humusluokitus 0-IV on varsin karkea. Koska luokkiin 0 ja II kuului ainoastaan viisi näytettä ja näistä neljä oli myöskin parhaimpia lujuudeltaan, on selvä, että tällöin korostuu humusluokituksen toimivuus lujuuden ennustamisessa.

NaOH-kokeessa liuksen väriin vaikuttavat vain heikkoon emäkseen liukevat komponentit, toisin sanoen ne, jotka voivat vaikuttaa myös hydraulissa sideainereaktiossa. Tältä pohjalta tarkasteltuna humusluokka on hyvä lujuuden kehitystä kuvaava tekijä.

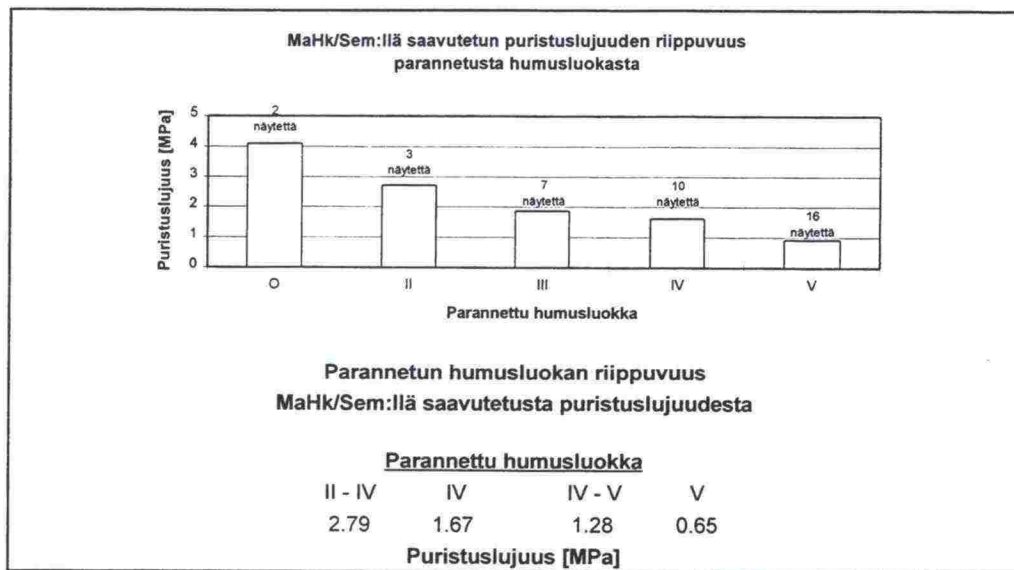


Kuva 28: Sementtiaktivoidulla masuunihiekalla stabiloidun näytteen 91 vrk:n puristuslujuuden ja humusluokan välinen keskimääräinen riippuvuus.

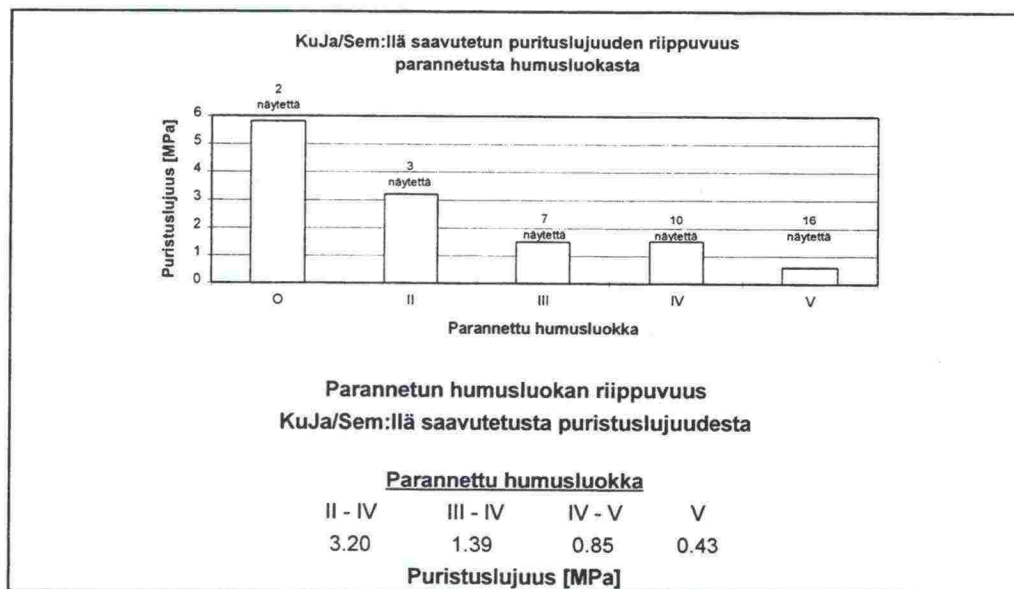


Kuva 29: Sementtiaktivoidulla kuonajauheella stabiloidun näytteen 28 vrk:n puristuslujuuden ja humusluokan välinen keskimääräinen riippuvuus.

NaOH - kokeessa luokkaan IV kuuluneissa näytteissä erottui selvästi kaksi ryhmää: tumman ruskeat ja mustat. Tämän perusteella luokitusta muutettiin siten, että mustat muutettiin luokaksi V. Luokkaan V tuli 16 näytettä (kuvat 30 ja 31). Sementtiaktivoidulla masuunihiekalla stabiloiduilla näytteillä yhdeksän heikointa näytettä kuului tähän luokkaan ja näiden yhdeksän lisäksi viisi näytettä oli keskiarvoa heikommoin lujittuneita. Sementtiaktivoidulla kuonajauheella kaikki 16 näytettä olivat keskiarvoa heikompia ja kahdeksan heikointa näytettä kuului luokkaan V.



Kuva 30: Sementtiaktivoidulla masuunihiekalla stabiloidun näytteen 91 vrk:n puristuslujuuden ja parannetun humusluokan välinen keskimääräinen riippuvuus.

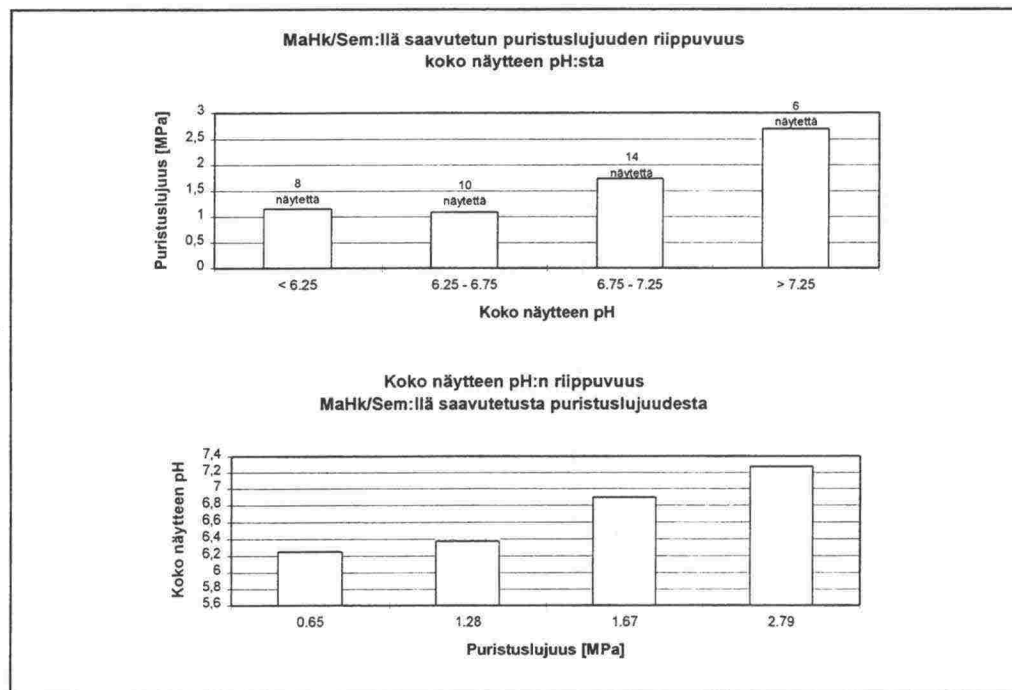


Kuva 31: Sementtiaktivoidulla kuonajauheella stabiloidun näytteen 28 vrk:n puristuslujuuden ja parannetun humusluokan välinen keskimääräinen riippuvuus.

Perinteisessä humusluokituksessa lujuuserot eri luokkien välillä ovat hyvin selvät, koska jakokin on niin karkea. Sen sijaan parannetussa humusluokituksessa tasoittuu luokkien III - V materiaalien lujuuserot. Sementtiaktivoidulla kuonajauheella keskimääräisiä lujuuksia tarkasteltaessa luokan IV lujuuksien keskiarvo on jopa hieman parempi kuin luokan III.

Koko stabiloitavan massan pH:n kasvulla on lujuutta keskimäärin lisäävä vaikutus (kuvat 32 ja 33). pH:n kasvulla välillä 4,5-6,75 vaikutus lujuuden

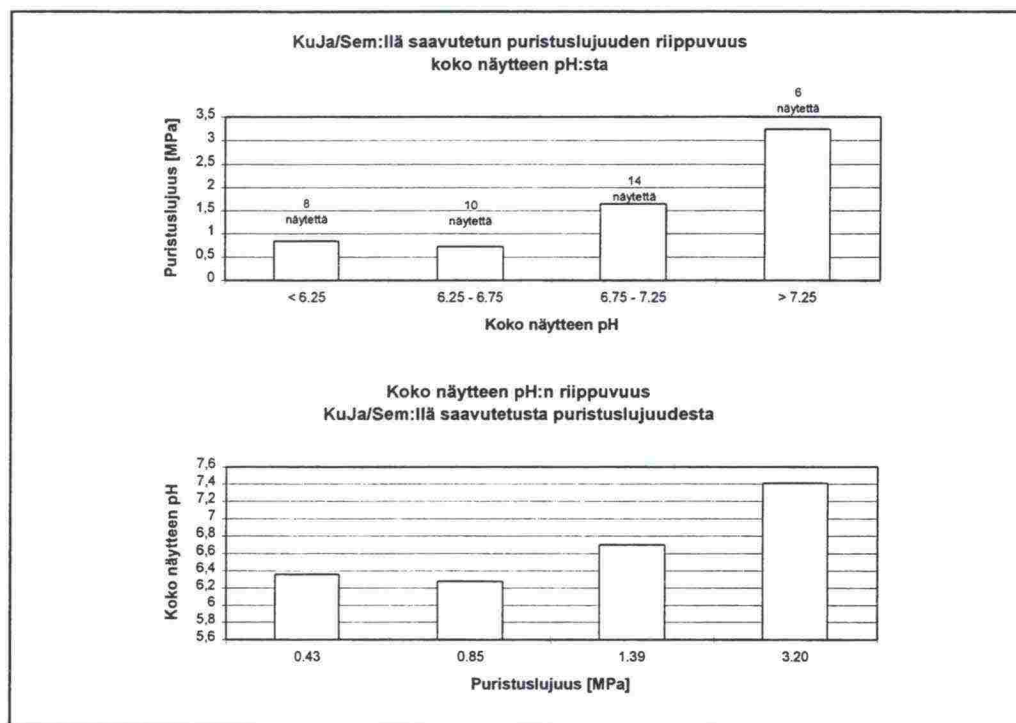
kasvuun ei ole niin voimakas. Näin alhaisilla pH:n arvoilla lujuus jää heikoksi. pH:n kasvaessa arvosta 6,75 ylöspäin alkaa keskimääräinen vaikutuskin olla selvempi, koska edellytykset sideainereaktion käynnistymiselle paranevat. Kun pH on 6,75-7,25, lujittuvat näytteet kohtalaisesti ja pH:n ollessa yli 7,25 ovat näytteet selkeästi hyvin lujittuvia. Selkeästi hyvin lujittuvia näytteitä pH:n avulla tarkasteltuna oli ainoastaan 6 kappaletta.



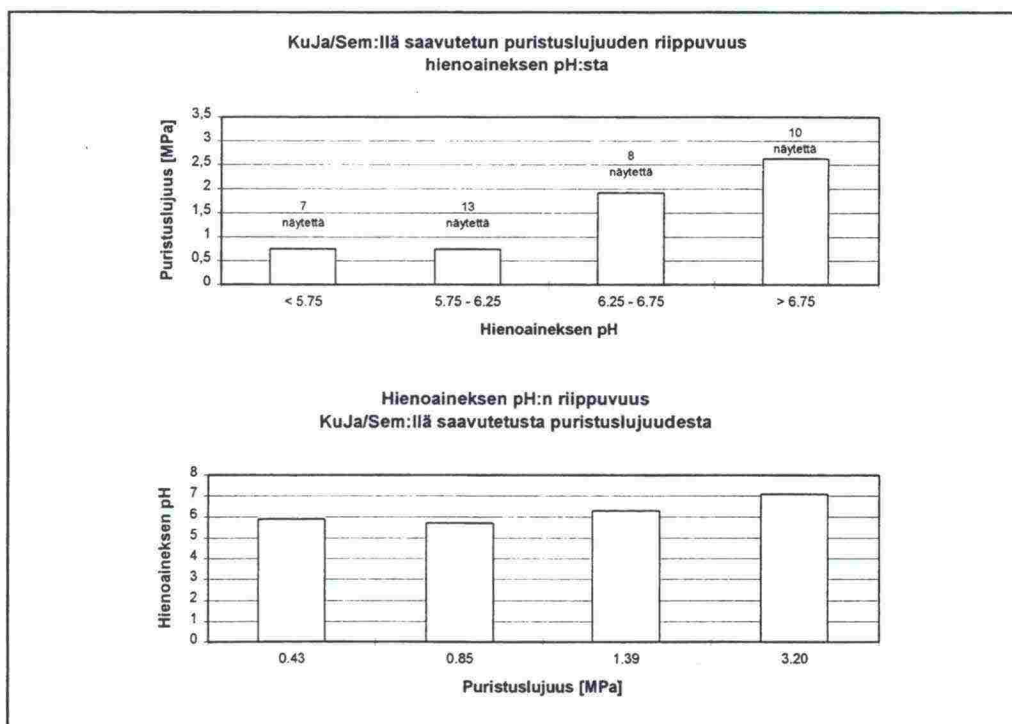
Kuva 32: Sementtiaktivoitulla masuunihiekalla stabiloidun näytteen 91 vrk:n puristuslujuuden ja koko näytteen pH:n välinen keskimääräinen riippuvuus.

Kuonajauheen suurempi herkkyys hienoaineksen vaikutuksille näkyy myös pH:n osalta (kuva 34). Hienoaineksen pH:n ollessa alle 6,25 ei lujittumista juurikaan tapahdu. Hienoaineksen pH:n arvoilla 6,25-6,75 lujittumista on tapahtunut jonkin verran. Kun pH > 6,75, on lujuuskin hyvä. Hyvin lujittuvaan ryhmään hienoaineksen pH:n perusteella kuuluu 10 näytettä, joten koko näytteen pH-arvoon verrattuna otos on parempi.

Sekä kalsiumin- että magnesiuminvaihtokapasiteetilla ja vaihtuvien kationien kapasiteetilla laskettuna 1-arvoiselle metallille on keskimäärin vaikutusta lujuuteen, kun taas natriumin- ja kaliuminvaihtokapasiteetilla vaikutus on huomattavasti vähäisempi. Kalsiumin ja magnesiumin merkittävämpi vaikutus lujuuteen johtuu ainakin osittain siitä, että ne ovat kahdenarvoisia ioneja, kun taas natrium ja kalium ovat yhdenarvoisia. Kalsiumin- ja magnesiuminvaihtokapasiteettien raja-arvot on hyvin vaikea määrittää lujuustarkastelun kannalta, koska näytteet jakaantuisivat tällöin hyvin epätasaisesti. Sama pätee myös vaihtuvien kationien kapasiteetille laskettuna 1-arvoiselle metallille. Tässä tutkimuksessa suoritettua jaottelua vaikutus jää hieman epä-määräiseksi.



Kuva 33: Sementtiaktivoidulla kuonajauheella stabiloidun näytteen 28 vrk:n puristuslujuuden ja koko näytteen pH:n välinen keskimääräinen riippuvuus.



Kuva 34: Sementtiaktivoidulla kuonajauheella stabiloidun näytteen 28 vrk:n puristuslujuuden ja hienoaineksen pH:n välinen keskimääräinen riippuvuus.

Tulosten perusteella näyttäisi kuitenkin siltä, että kalsiuminvaihtokapasiteetilla vaikutus lujuuteen on melko suoraviivainen. Kun Ca-kapasiteetti kasvaa, niin lujuuskin kasvaa. Myöskin magnesiuminvaihtokapasiteetin vaikutus on samanlainen. Poikkeuksena ovat suurimmat Mg-kapasiteetin arvot, joilla lujuus on hieman heikompi kuin pienemmän Mg-kapasiteetin omaavilla materiaaleilla. Syynä tähän voi olla se, että näissä näytteissä on jokin tai joitakin tekijöitä, jotka vaikuttavat magnesiuminvaihtokapasiteettia enemmän lujuutta heikentävästi. Kun 1-arvoiselle metallille laskettu vaihtokapasiteetti kasvaa välillä 0-7 mmol, kasvaa lujuuskin melko voimakkaasti. Tätä suuremmilla kapasiteetin arvoilla ei ole niin voimakasta vaikutusta lujuuden kasvuun.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa selvitettiin stabiloitavassa tiemateriaalissa selkeästi lujittumiseen vaikuttavat tekijät ja tunnusluvut. Tämä toimii lähtötietona, kun jatkossa kehitetään kuonatuotteisiin liittyvää sideainereseptiikkaa, ja tämän pohjalta edelleen mitoitusparametrejä. Lisäksi tavoitteena oli vanhojen tiemateriaalien luokittelu stabiloituvuuden mukaan, kun tarkasteltavana muuttujana on saavutettava lujuustaso. Sideaineina käytettiin masuunihiekkaa ja kuonajauhetta sementtiaktivoituina. Vertailusideaineina olivat sementtiaktivoitu valssimurskattu granuli ja Yleissementti.

Tutkittavia tekijöitä ja tunnuslukuja oli kaikkiaan 57 kappaletta. Näistä yksikään ei erottunut selvästi saavutettua lujuutta selittäväksi tekijäksi. Sen sijaan lujuuteen keskimääräistä enemmän vaikuttavat tekijät erottuivat hyvin. Se, missä suhteessa kukin tekijä vaikuttaa, on hyvin vaikea osoittaa. Vaikutusmekanismit ovat siinä määrin monimuotoisia, että ei ole mielekäästä esittää mitään valmista yhtälöä tai mallia, jonka perusteella voitaisiin saavutettava puristuslujuus muutaman muuttujan avulla laskea.

Mikäli haluttaisiin perusteellisesti selvittää, missä suhteessa kukin tekijä vaikuttaa, jouduttaisiin suorittamaan varsin perusteellisia poikkitieteellisiä tutkimuksia. Koska ennakkokokeita joudutaan kuitenkin aina tekemään, stabiloinnin kuonasideainereseptiikan kannalta tämä ei ole mielekäästä. Tärkeintä on selvittää raja-arvot, joiden perusteella voidaan rajata tietyt sideainereseptit pois ja siten vähentää ennakkokokeiden määrää.

Lujuuteen selkeästi vaikuttavia tekijöitä ja tunnuslukuja oli sementtiaktivoidulla masuunihiekalla 8 kappaletta ja kuonajauheella vastaavasti 10 kappaletta. Stabiloitavan tiemateriaalin rakeisuudesta johtuvat tekijät vaikuttavat masuunihiekalla kuonajauhetta enemmän. Kuonajauhe puolestaan on herkempi hienoineksessa vaikuttaville tekijöille, kuten humukselle. Kummallakin sideaineella vaikuttavia tekijöitä ja tunnuslukuja ovat läpäisyprosentteja 40 ja 50 vastaavat raekoot, hienoineksen humuspitoisuus, humusluokka, koko näytteen pH, kalsiumin- ja magnesiuminvaihtokapasiteetit sekä vaihtuvien kationien kapasiteetti laskettuna 1-arvoiselle metallille. Edellisten lisäksi kuonajauheella vaikuttavat läpäisy-% 30 vastaava raekoko d_{30} ja hienoineksen pH.

Hieman vähemmän vaikuttavia tekijöitä ovat materiaalin hienoineksen sekä hiekka- ja soralajitteiden määrät. Mikäli hienoinesta on erityisen vähän, sillä on lujuutta heikentävä vaikutus. Hiekkalajitteen määrän kasvu heikentää keskimäärin lujuutta ja soralajitteen määrän kasvulla vaikutus on luonnollisesti päinvastainen.

Selkeästi vaikuttavien tekijöiden osalta masuunihiekalla tai kuonajauheella stabiloitavan materiaalin puristuslujuus kasvaa, kun keskimäärin tarkasteltuna:

- läpäisy-% 40 vastaava raekoko kasvaa
- läpäisy-% 50 vastaava raekoko kasvaa
- hienoaineksen humuspitoisuus pienenee
- humusluokka pienenee
- koko näytteen pH kasvaa
- kalsiuminvaihtokapasiteetti kasvaa
- magnesiuminvaihtokapasiteetti kasvaa
- 1-arvoiselle metallille laskettu vaihtuvien kationien kapasiteetti kasvaa.

Sideainereseptiikan kehittämisen kannalta rutiininomaisesti määritettäviä lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat läpäisy-% 40 ja 50 vastaavat raekoot, hienoaineksen humuspitoisuus, humusluokka ja pH. Lisäksi voi määritettävänä tekijöinä olla hiekka- ja soralajitteiden määrät.

Vaikuttavien tekijöiden perusteella voidaan suorittaa karkea luokittelu tiemateriaalien stabiloitavuuden mukaan, kun tarkastelun kohteena on saavutettava puristuslujuus. *Karkea ja suuntaa-antava* jaottelu lujuustarkastelun suhteen on seuraava: 1) huonosti lujittuvat, 2) keskinkertaisesti lujittuvat ja 3) hyvin lujittuvat materiaalit. Seuraavassa taulukossa on esitetty stabiloituvuusluokkien suuntaa-antavat raja-arvot rutiininomaisesti määritettävien tekijöiden osalta:

Vaikuttava tekijä	Stabiloituvuusluokkien raja-arvot		
	Hyvin lujittuvat	Keskinkertaisesti lujittuvat	Huonosti lujittuvat
d ₄₀ [mm]	> 1,0	0,5 - 1,0	< 0,5
d ₅₀ [mm]	> 1,75	0,75 - 1,75	< 0,75
Hienoaineksen humuspitoisuus [%]	< 1,8	1,8 - 3,0	> 3,0
Parannettu humusluokka	0 - IV	III - V	V
Koko näytteen pH	> 7,25	6,25 - 7,25	< 6,25

On huomattava, että vaikuttavilla tekijöillä ja tunnusluvuilla on luonnollisesti ääriarvot. Esimerkiksi läpäisy-% 40 vastaava raekoko ei voi kasvaa ääretömiin.

Rakeisuustekijät edellä esitetyssä luokituksessa tarkoittavat 16 mm:n läpäisseestä aineksesta saatuja raja-arvoja. Edellä esitetyt stabiloituvuusluokittelun raja-arvot ovat varsin karkeita. Kussakin luokassa materiaalin vaikuttavan tekijän arvo on vain keskimääräinen eikä siten tiettyyn stabiloituvuusluokkaan kuuluva materiaali välttämättä kaikkien tekijöiden osalta kuulu k.o.

luokkaan. Hyvin lujittuvalla materiaalilla voi hienoaineksen humuspitoisuus olla esimerkiksi 2,1 %.

Vertailusideaineista saatujen tulosten perusteella näyttäisi siltä, että sideainepitoisuuden ollessa 3 %, toimii sementti kuonajauhetta paremmin. Puh-
taalla kalliomurskeella kuonajauhe lujittui paremmin ja vähän humusta sisältävillä materiaaleilla sillä saatiin samaa suuruusluokkaa olevia lujuuksia kuin sementillä. Toisaalta on muistettava, että kuonajauhe on sementtiä huomattavasti edullisempaa ja siten kuonajauhetta voi käyttää suurempia määriä. Valssimurskattu granuli puolestaan vaikuttaa varsin hyvältä sideaineelta. Siinä yhdistyvät ainakin jossain määrin kuonajauheen reaktiivisuus ja masuunihiekan rakeisuus. Toiminnaltaan valssimurskattu granuli on kuitenkin lähinnä masuunihiekkaan verrattavissa oleva sideaine. Valssimurskattua granulua tarvitsee keskimäärin vain puolet masuunihiekan määrästä, kun tavoitellaan jotain tiettyä lujuutta.

Olennaista kuonasideaineiden reseptiikan kehittämisessä on löytää yhtälöt, joilla alle 16 mm:n aines saadaan vertailukelpoiseksi tiessä olevan materiaalin kanssa. Masuunihiekalla paikallasekoitteisesti stabiloitaessa tulee myös vanha päällyste osaksi stabiloitua seosta. Vanhan päällysteen määrän ja tyyppin vaikutus lujuuteen ja ennenkaikkea koko rakenteen toimivuuteen on myös tärkeä asia, joka tulee selvittää.

Humusluokitus on varsin nopea ja helppo tapa stabiloituvuuden ennustamisessa. Menetelmänä se on kuitenkin varsin karkea ja värimäärityskin usein hyvin subjektiivista. Humusluokitusta tulisikin kehittää samansuuntaisesti kuin mitä tässä työssä on IV-luokan osalta tehty. Etenkin tämä koskee luokkia III ja IV. Koska näidenkin luokkien sisällä olevilla näytteillä on liuoksen väreissä vivahde-eroja, tulisi näiden erojen perusteella jakaa k.o. luokat vielä useampiin alaluokkiin. Tällöin saataisiin nopeasta määritysmenetelmästä myös huomattavasti tarkempi. Sideainereseptiikan kannalta tunnusluvuksi tulisi ottaa myös sideaine/runkoaine -seoksen pH:n ja lujuuden välinen riippuvuus, koska lopullinen pH on se tekijä, joka kuvaa reagointia tai reagoimattomuutta.

Sementti on kuonareaktion aktivaattorina varsin varma ja loogisesti käyttäytyvä, koska se lujittuu myös itse. Kalkki puolestaan toimii aktivaattorina, mutta on epävarma, koska se ei itse lujitu. LD-teräskuona sisältää runsaasti kalkkia ja sillä on heikon portlandklinkkerin ominaisuudet, joten sillä on jonkin verran sekä kalkin että sementin ominaisuuksia. Olisikin varsin mielenkiintoista selvittää teräskuonan soveltuvuutta masuunikuonan aktivaattoriksi. Tällöin sideaineiden hintaakin saataisiin pienennettyä.

8 KIRJALLISUUSLUETTELO

Coulter LS 230 -manuaali PN 4237214 A (käännös 24.04.1995).

Geotekniset laboratorio-ohjeet GLO-85. Suomen Geoteknillinen yhdistys r.y. Rakentajain Kustannus Oy. Helsinki 1985. 107 s.

Hiltunen, A. & Putro, J. & Pöyliö, E., Production, use and improved utilization of the by-products of blast furnace based steel works in Finland. Seminar on the Steel Industry and Recycling 24-27 April 1995. Düsseldorf. 22 s.

Hiltunen, R., LuK-tutkielma vanhojen teiden runkoaineksen koostumuksesta. Oulun yliopisto, geotieteiden ja tähtitieteen laitos. Oulu 1994. 22 s. + liitteet.

Höbeda, P., Inverkan av organiskt material vid stabilisering med hydrauliska bindemedel, en litteraturundersökning. VTI Meddelande nr. 383. Linköping 1984. 26 s.

Jelinek, R. & Adolf, H. & Meyer, D., Verfestigung von Böden mit organischen Beimengungen. Technische Universität München. München 1980.

Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, osa II, laboratoriotutkimukset. TVH 2.660. Helsinki 1974. 153 s.

Masuunihiekan käyttö päällysrakennekerroksissa. Tielaitoksen selvityksiä 47/1994. Helsinki 1994. 34 s. + liitteet.

Masuunikuonakokeilu Pt 18586 Tuohinto - Pikarinmäki. Yhteenveto tutkimuksista vuosina 1981-1982. Tie- ja vesirakennuslaitos. Oulun piiri 1983.

Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa. Tielaitoksen selvityksiä 15/1993. Oulu 1993. 29 s.

Pylkkänen, K. & Valkonen, A., Masuunikuonan käyttö maarakentamisessa. Kooste Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian laitoksella tehdyistä tutkimuksista. Julkaisematon. Tampere 1993.

Rahiala, J., Maabetoni ja betonipäällysteet...käytössä maailmalla, sopivatko Suomeen? Betonitieprojekti. TVH 723867. Turku 1988. 275 s.

Rantala, J., Humushappojen vaikutus savien stabiloitavuuteen. Tutkimusraportti. Turun yliopisto, maaperägeologian laitos. Turku 1990. 34 s.

Rautaruukki Oy:n laatukäsikirja, laitekohtaiset ohjeet. Hiukkaskokoanalyysaattori, Coulter LS 230 ylläpito ja kalibrintiohje (alustava ohje 11.09.1995). 2 s.

Ruohomäki, J., Stabilointiprojekti, loppuraportti. VTT Rakennustekniikka. Espoo 1995. 37 s. + liitteet.

Sementtistabilointiohje, Valvonta ja laadunvalvonta. Tielaitos, Helsinki 1992. 45 s. + liitteet.

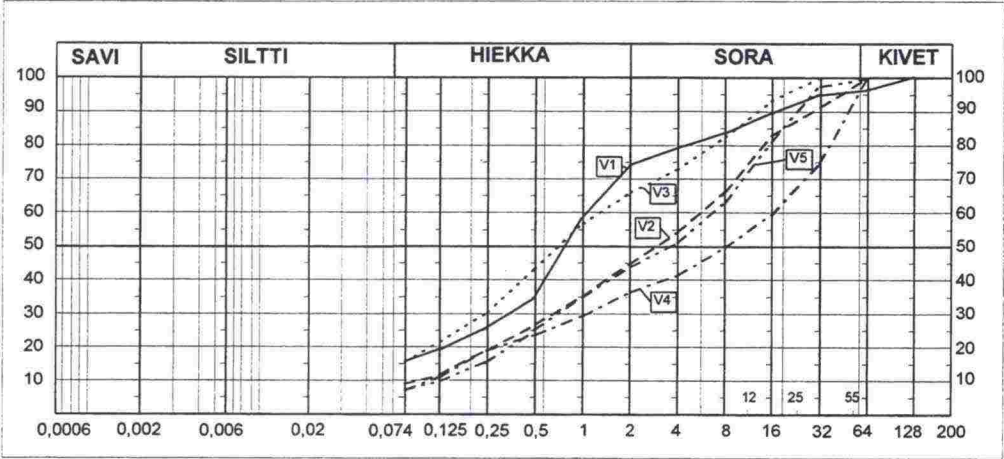
Sherwood, P.T., The measurement of the pH of soil - cement pastes as diagnostic test for the presence of deleterious soil organic matter. Road Research Laboratory; Research Note No RN/3837, 1960.

Viljas, P., Kalkkisulfaattiaktivoitu masuunikuona stabiloinnin sideaineena. Oulun yliopisto, rakentamistekniikan osasto, geotekniikan laboratorio, lisen-siaatintyön käsikirjoitus. Oulu 1995.

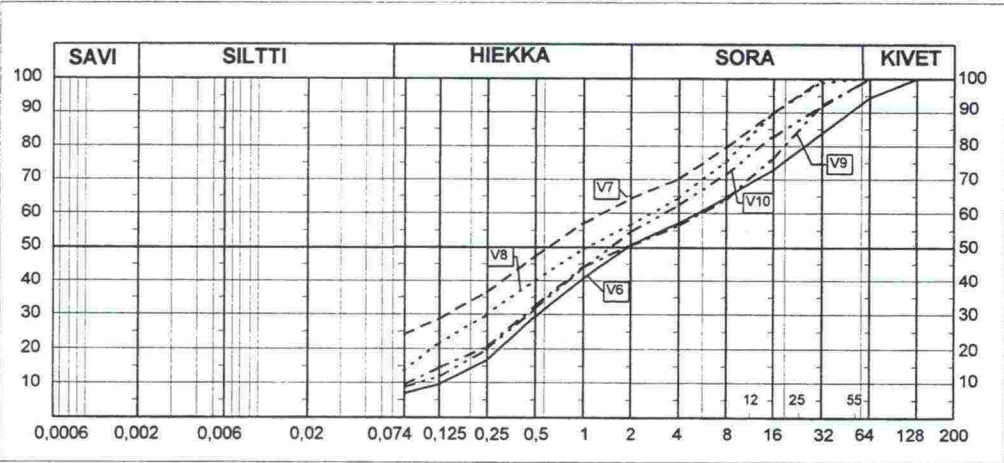
Tutkimusmateriaalien hankintatiedot

Näyte nro	Tien tyyppi ja numero	Hankinta- paikka	KVL	Pääll. tyyppi
V1	Taajamatie	Oulu, Kajaanintie	5000	ÖS
V2	Taajamatie	Oulu, Kajaanintie	1000	ÖS
V3	Pt 18646	Muhos	390	AB
V4	Taajamatie	Oulu, Kiimingintie	5270	KAB
V5	Pyörätie	Oulu, Kiimingintie	-	KAB
V6	Mt 836	Ylikiiminki, Puolangantie	540	ÖS
V7,V8,V9	Mt 830, eri kerroksista	Muhos	180	ÖS
V10	Paikallistie	Alatemies	-	Sr
V11	Mt 945	Kemijärvi, Sallantie	600	Sr
V12	Mt 630	Jyväskylä, Jokihaara	1310	KAB
V13	Kt 78	Pudasjärvi, Puolangantie	700	KAB
V14	Vt 20	Pudasjärvi, Kuusamontie	1700	AB
V15	Kt 78	Ranua - Pudasjärvi	670	ÖS
V16	Mt 941	Ranua	300	ÖS
V17	Pt 19599	Ranua	70	Sr
V18	Mt 854	Yli-Ii, Kipinäntie	350	AB
V19	Pt 14613	Kouvola, Häkämäen Pt	400	ÖS
V20	Mt 830	Oulu	1980	AB
V21	Vt 4	Rantsila - Temmes	-	AB
V22	Mt 249	Vammala	1230	AB
V23	Pt 19514	Kemi, Pajusaaren Pt	3000	AB
V24	Vt 4	Rovaniemi	4850	AB
V25	Vt 4	Lohijoki - Vuotso	1030	ÖS
V26	Mt 774 ¹⁾	Kalajoki, Tynkä - Typpö	550	ÖS
V27	Pt 18083 ¹⁾	Etelänkylä	550	ÖS
V28	Vt 21	Pello - Kolari	1500	ÖS
V29	Mt 950	Salla	550	ÖS
V30	Mt 861	Taivalkoski	450	ÖS
V31	Mt 894	Taivalkoski, Jänispalo	2000	ÖS
V32	Mt 858	Pudasjärvi	110	Sr
V33	Kt 85 ¹⁾	Nivala - Haapaveden kr	1300	AB
V34	Kt 88 ¹⁾	Vihanti - Alpua	900	KAB
V35	Pt 19141	Juurikkalahti - Teerivaara	60	Sr
V36	Pt 19145	Naapurivaara - Ärväs	100	Sr
V37	Mt 760 ¹⁾	Reisjärvi	450	ÖS
V38	Mt 3291	Jämsä, Alhojärvi	200	Sr
V39	Pt 16581	Jämsä, Juokslahti	220	KAB
U1	Turku, Vt 1:n työmaa			
U2	Oulu, Alakylän murskaamo			
U3	Kemi, Elijärven kaivoksen sivukivi-peridotiittia			
U4	Kemi, Elijärven kaivoksen sivukivi-graniittia			
1) Masuunihiekkastabilointikohteita				

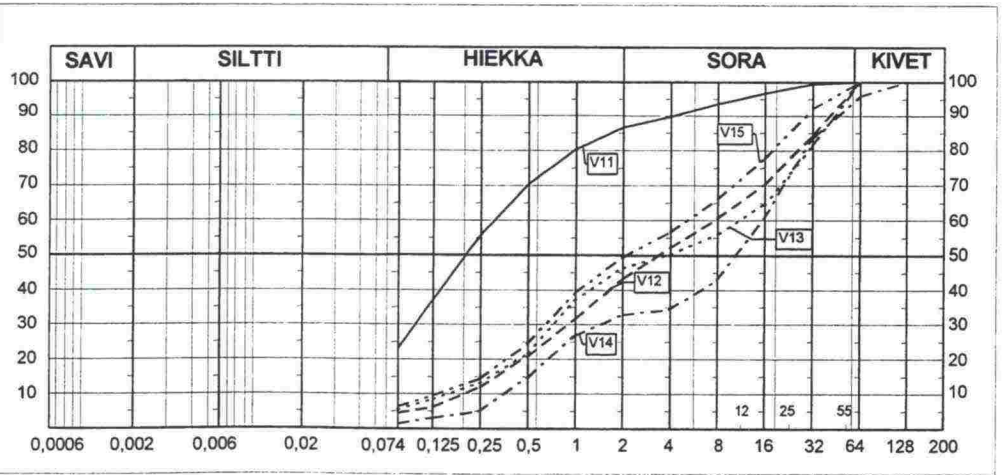
V1...V5



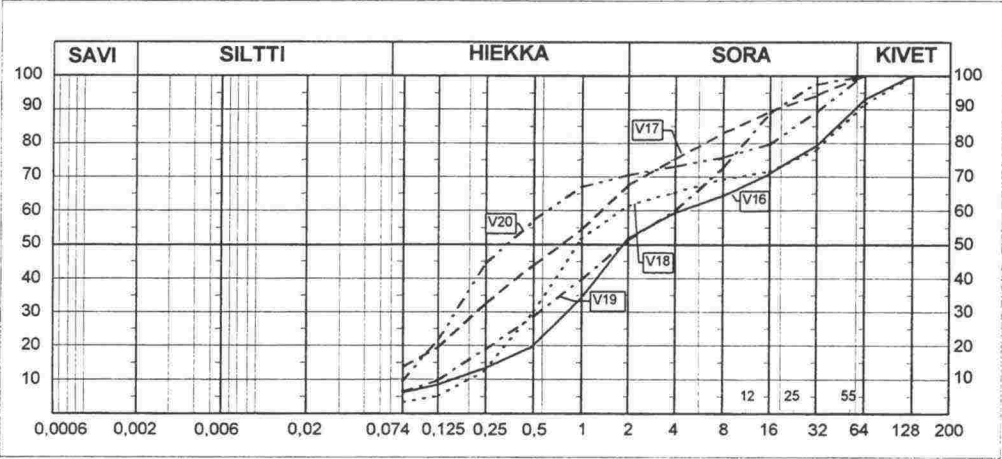
V6...V10



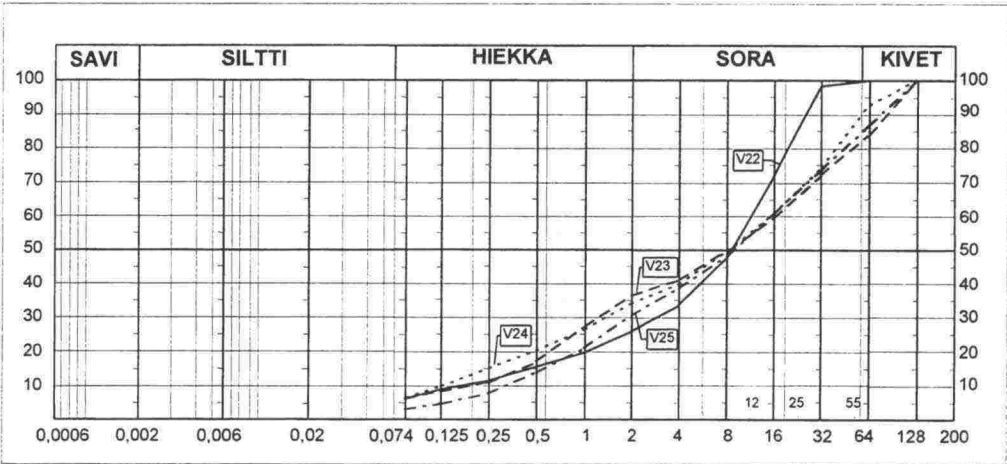
V11...V15



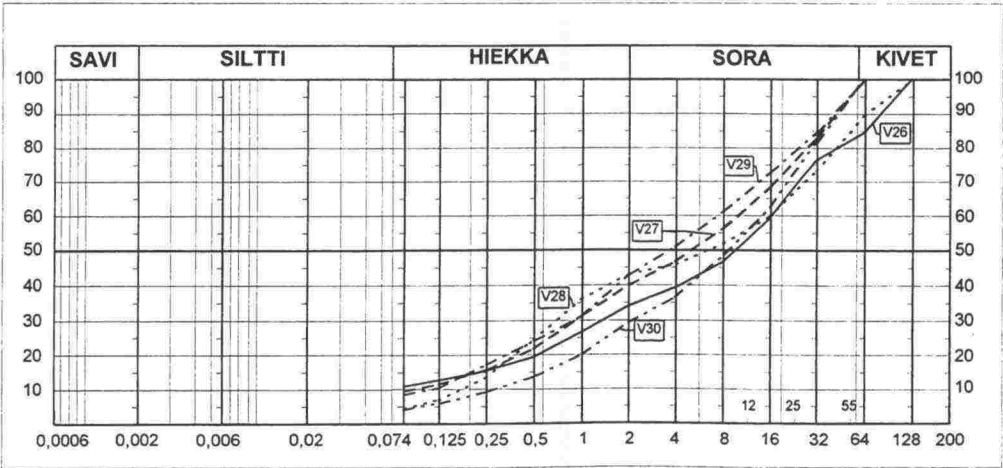
V16...V20



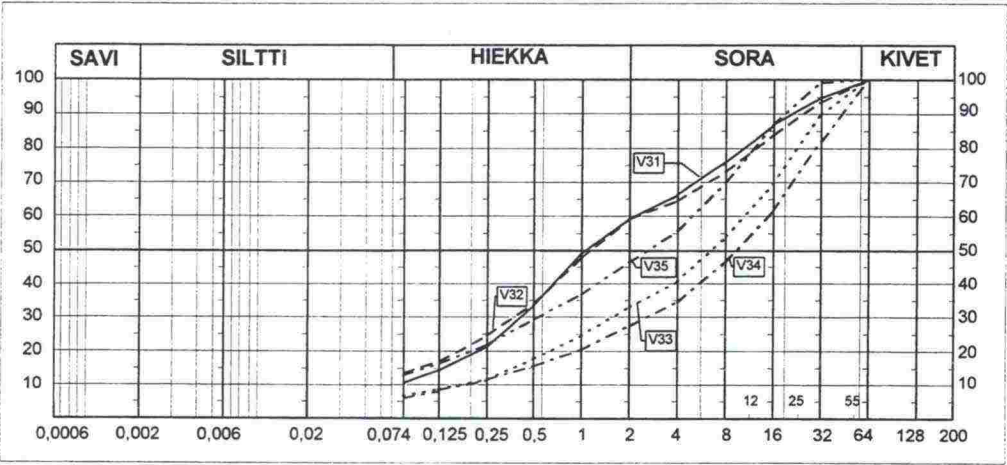
V22...V25



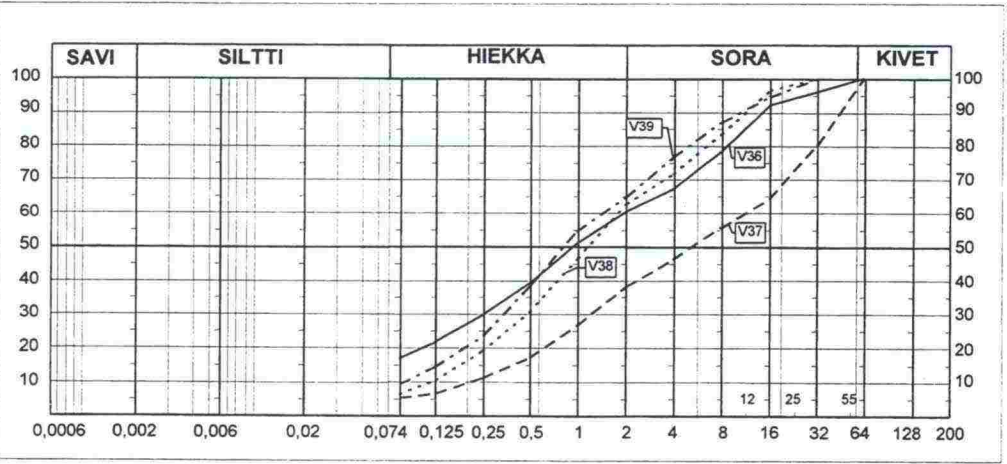
V26...V30



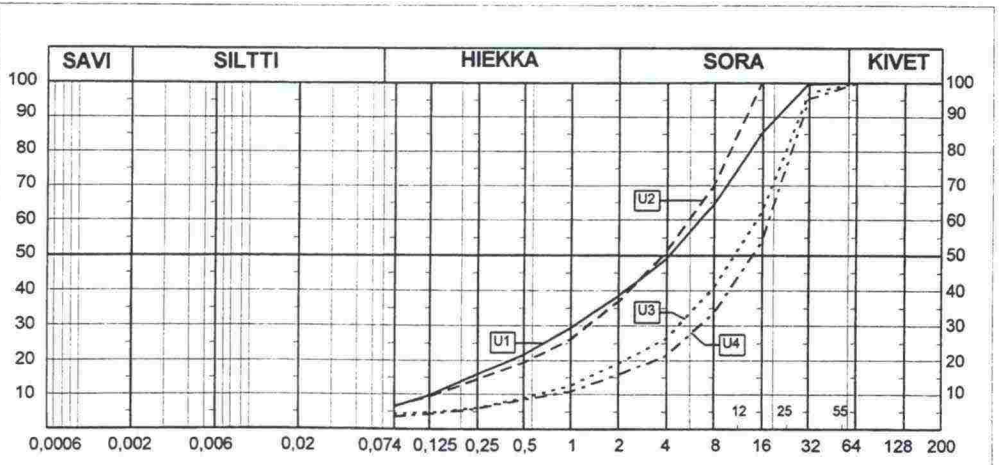
V31...V35



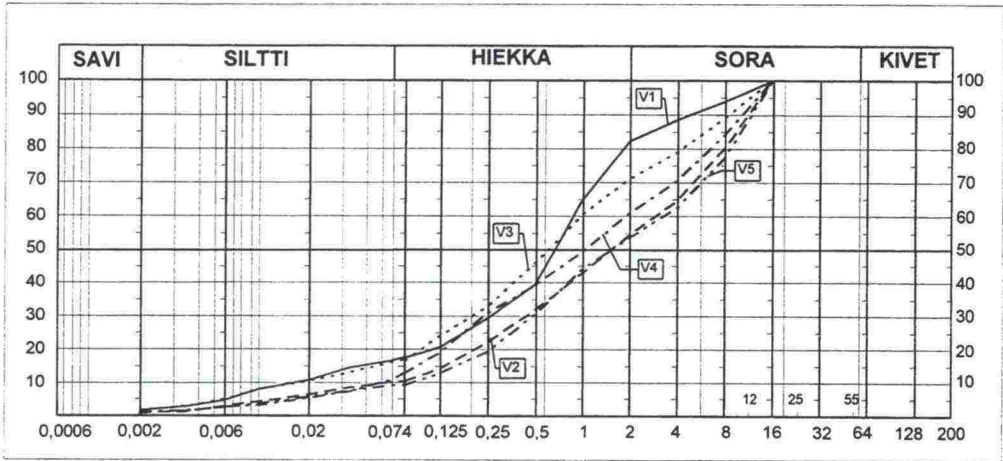
V36...V39



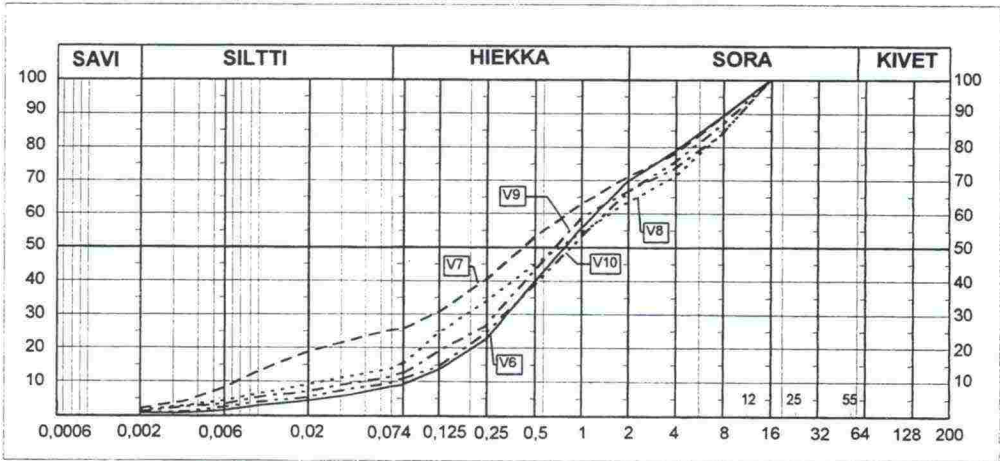
U1...U4



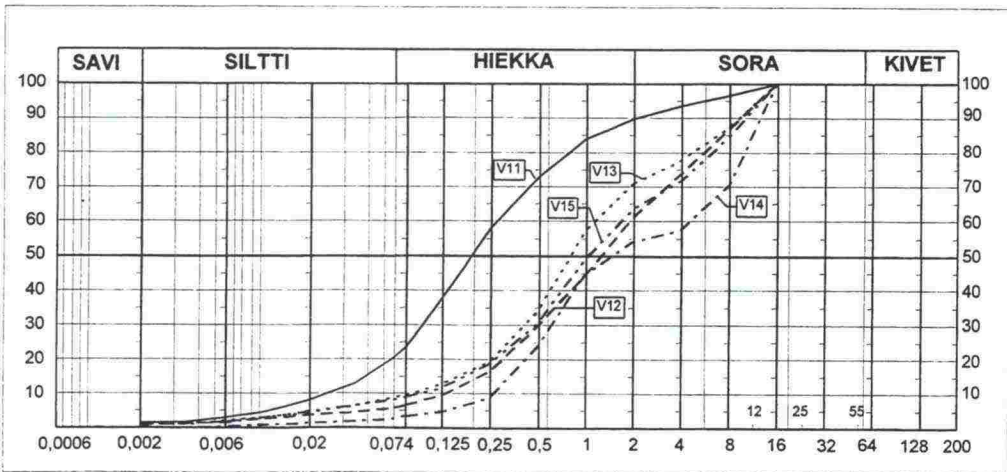
V1...V5 (<16 mm)



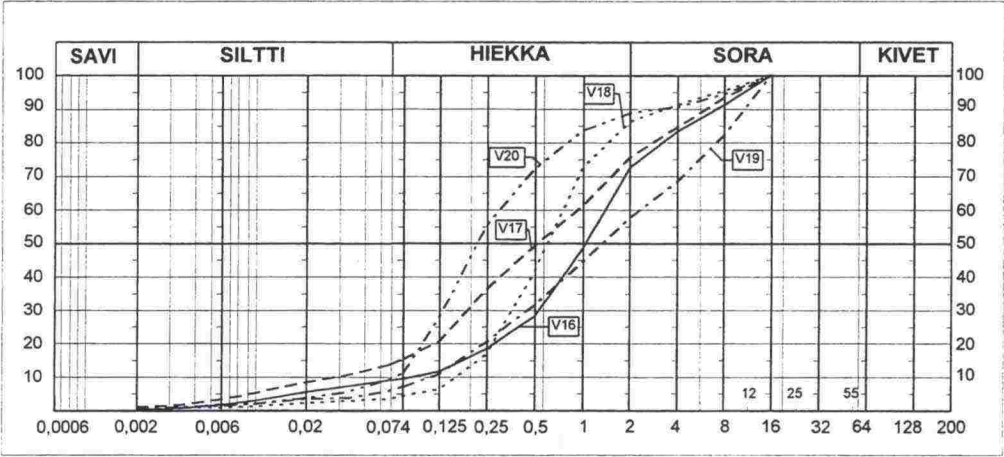
V6...V10 (< 16 mm)



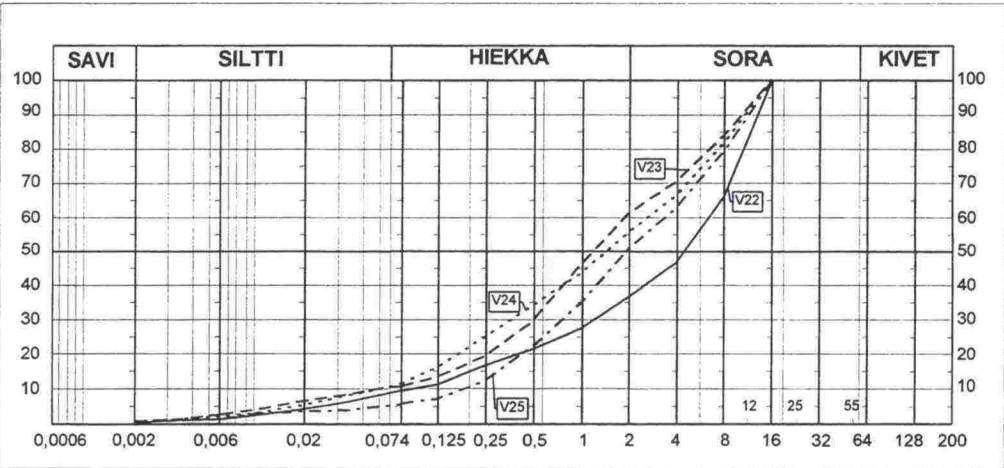
V11...V15 (< 16 mm)



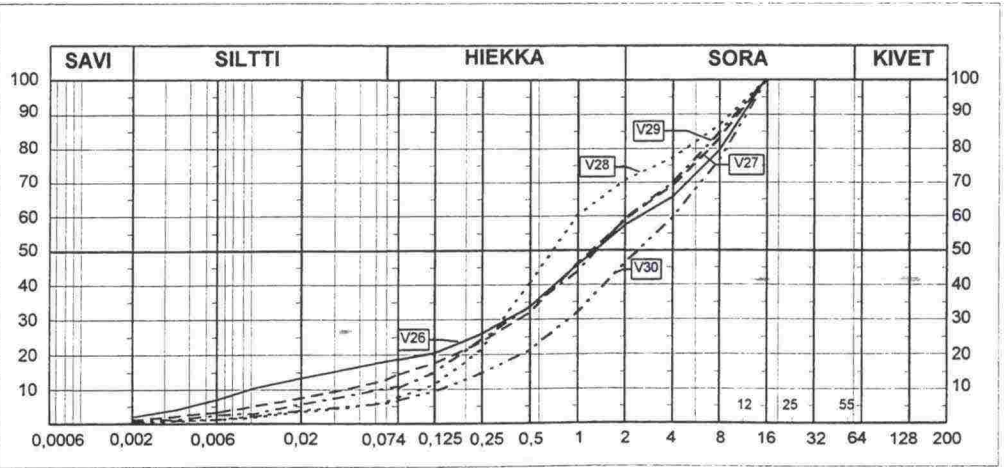
V16...V20 (< 16 mm)



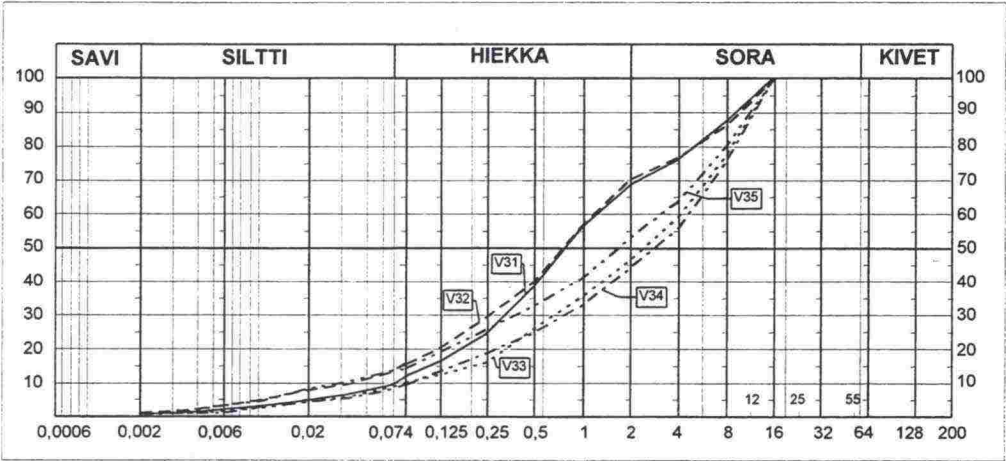
V22...V25 (< 16 mm)



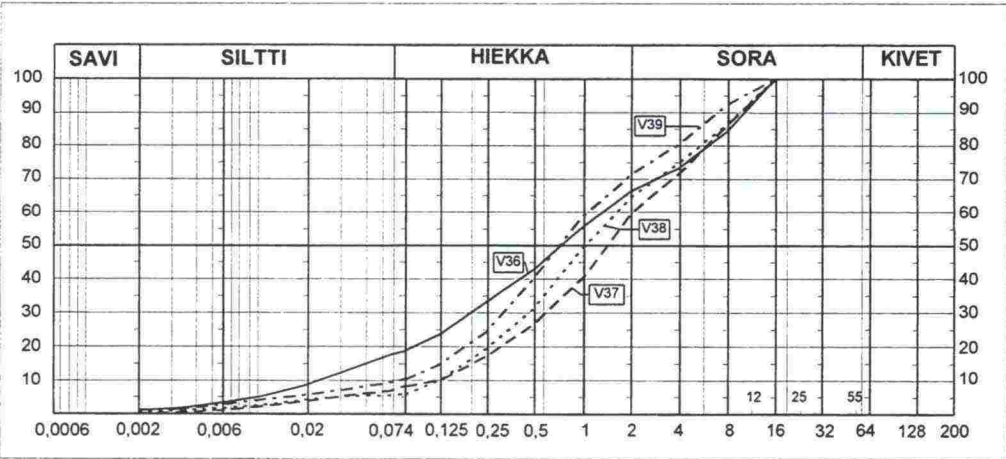
V26...V30 (< 16 mm)



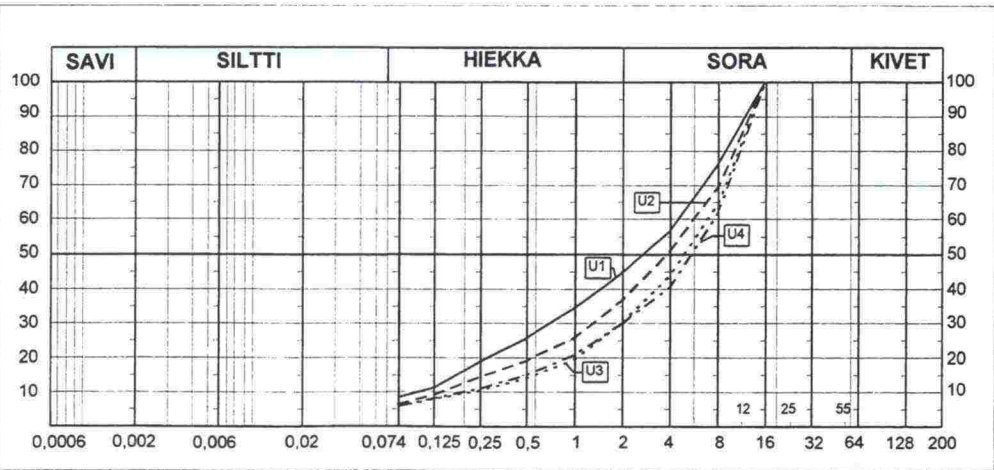
V31...V35 (< 16 mm)



V36...V39 (< 16 mm)



U1...U4 (< 16 mm)



Vanhojen tiemateriaalien humuspitoisuudet, humushappopitoisuudet ja humusluokat

Näyte	Humuspitoisuus [%]		Humushappopitoisuus [%]	Humusluokka	Parannettu humusluokka
	hienoaaines	koko näyte			
V1	3,27	1,30	0,89	IV	V
V2	2,33	1,21	0,12	III	III
V3	2,48	0,95	1,12	IV	V
V4	1,98	1,06	1,07	IV	IV
V5	3,07	1,17	1,17	IV	V
V6	2,58	1,19	0,58	III	III
V7	2,53	1,45	0,46	IV	V
V8	2,40	-	0,36	IV	IV
V9	2,30	0,88	0,50	IV	V
V10	2,29	0,96	0,48	IV	IV
V11	0,51	0,35	-	III	III
V12	2,14	0,64	0,36	IV	IV
V13	1,76	0,63	0,37	II	II
V14	5,81	1,15	0,77	IV	V
V15	2,48	0,66	0,55	IV	V
V16	1,83	0,53	0,17	IV	IV
V17	3,71	1,72	0,34	IV	V
V18	3,08	0,68	0,51	IV	V
V19	2,26	0,94	0,70	IV	V
V20	2,06	0,92	0,71	IV	V
V22	1,19	0,50	0,10	0	0
V23	3,07	1,08	0,28	III	III
V24	1,38	0,55	0,27	II	II
V25	3,61	0,91	0,55	IV	V
V26	2,93	1,47	0,10	III	III
V27	1,92	1,05	0,36	IV	IV
V28	1,36	0,44	0,17	IV	IV
V29	1,49	0,60	0,32	IV	IV
V30	1,86	0,91	0,25	IV	IV
V31	1,42	0,55	0,34	IV	IV
V32	2,22	0,76	0,77	IV	V
V33	2,77	1,03	0,75	IV	V
V34	0,89	0,71	0,18	0	0
V35	1,62	0,97	0,27	II	II
V36	3,08	1,38	0,55	III	III
V37	2,25	0,85	0,50	III	III
V38	3,04	1,37	0,92	IV	V
V39	2,73	1,03	0,78	IV	V

Vanhojen tiemateriaalien ja uusien kalliomurskeiden pH:t

Näyte	pH		Näyte	pH	
	Hienoaines	< 1,0 mm:n aines		Hienoaines	< 1,0 mm:n aines
V1	6,15	6,29	V23	7,60	7,59
V2	5,80	6,50	V24	7,52	7,72
V3	5,53	5,93	V25	6,03	6,37
V4	4,59	5,35	V26	6,57	6,58
V5	4,39	5,03	V27	6,70	7,31
V6	5,95	6,81	V28	7,16	7,14
V7	6,15	6,30	V29	6,90	7,05
V8	6,61	6,84	V30	6,84	7,20
V9	5,99	6,58	V31	6,85	7,10
V10	6,60	7,01	V32	6,20	6,58
V11	6,82	6,75	V33	5,97	6,48
V12	6,85	7,51	V34	8,12	8,83
V13	6,44	6,91	V35	5,94	6,06
V14	5,71	6,47	V36	5,06	5,46
V15	6,27	6,92	V37	6,52	7,12
V16	6,42	6,93	V38	5,22	6,21
V17	5,16	5,83	V39	5,81	6,27
V18	6,21	7,15	U1	7,89	8,56
V19	6,02	6,76	U2	8,90	9,17
V20	5,79	5,88	U3	9,34	9,48
V22	7,36	7,72	U4	8,96	9,26

Vanhojen tiemateriaalien ja uusien kalliomurskeiden sähkönjohtokyky

Näyte	Sähkönjohtokyky [μS/cm]	Näyte	Sähkönjohtokyky [μS/cm]	Näyte	Sähkönjohtokyky [μS/cm]	Näyte	Sähkönjohtokyky [μS/cm]
V1	263,1	V12	138,6	V24	509,9	V35	763,2
V2	1749,3	V13	97,92	V25	140,2	V36	0,0022
V3	178,7	V14	199,9	V26	110,7	V37	276,4
V4	1187,3	V15	117,7	V27	210,1	V38	0,0037
V5	673,2	V16	88,94	V28	113,1	V39	82,92
V6	176,0	V17	2,0	V29	81,80		
V7	343,7	V18	75,71	V30	65,41	U1	391,4
V8	204,9	V19	95,24	V31	80,78	U2	163,8
V9	166,7	V20	172,0	V32	537,7	U3	278,9
V10	318,2	V22	0,0031	V33	543,8	U4	184,4
V11	115,8	V23	1569,7	V34	313,1		

Vanhojen tiemateriaalien ja uusien kalliomurskeiden kalsiumin-, magnesiumin-, natriumin- ja kaliuminvaihtokapasiteetit sekä vaihtuvien kationien kapasiteetti laskettuna 1-arvoiselle metalille

Näyte	Ca-kap. [me Ca/100 g]	Mg-kap. [me Mg/100 g]	Na-kap. [me Na/100 g]	K-kap. [me K/100 g]	Vaihtokap. [mmol]
V1	3,61	0,648	0,449	0,500	7,69
V2	7,07	0,694	0,334	0,343	11,4
V3	2,02	0,415	0,278	0,340	4,58
V4	2,97	0,507	0,604	0,254	6,49
V5	1,84	0,553	0,216	0,232	4,11
V6	2,06	1,23	0,226	0,263	5,33
V7	3,17	0,859	0,216	0,404	6,59
V8	2,38	0,882	0,205	0,442	5,70
V9	1,73	0,346	0,264	0,261	3,91
V10	3,09	2,83	0,379	0,367	9,27
V11	0,93	0,066	0,159	0,089	1,87
V12	1,70	0,267	0,887	0,214	5,22
V13	3,75	0,510	0,275	0,187	6,73
V14	1,51	0,117	0,299	0,125	3,09
V15	1,88	0,237	0,256	0,158	3,68
V16	1,91	0,619	0,315	0,164	4,35
V17	4,67	0,073	0,350	0,123	7,11
V18	0,58	0,176	0,176	0,127	1,71
V19	3,29	0,474	0,141	0,180	5,51
V20	1,51	0,246	0,273	0,136	3,22
V22	16,79	4,01	0,717	0,582	29,3
V23	12,0	0,658	0,900	0,239	18,6
V24	5,03	0,563	1,12	0,146	10,2
V25	1,15	0,323	0,409	0,191	3,34
V26	3,73	1,15	0,562	0,329	8,32
V27	4,03	1,03	0,478	0,303	8,28
V28	2,63	0,977	0,517	0,161	6,20
V29	4,21	1,04	0,306	0,161	7,71
V30	2,02	0,395	0,171	0,261	4,09
V31	2,73	0,316	0,249	0,140	4,76
V32	3,23	0,144	0,168	0,190	5,12
V33	4,05	0,698	0,973	0,401	9,34
V34	6,31	,0645	0,821	0,397	11,7
V35	4,03	0,310	0,661	0,178	7,52
V36	7,43	0,355	0,513	0,178	11,5
V37	3,83	0,398	0,344	0,211	6,68
V38	10,36	0,510	0,405	0,344	15,4
V39	2,14	0,234	0,259	0,234	4,14
U1	6,63	1,16	0,313	0,381	-
U2	2,83	0,16	0,251	0,334	-
U3	5,71	3,65	0,292	0,295	-
U4	6,21	0,32	0,137	0,232	-

Lujittumiseen vaikuttavat tekijät ja niitä kuvaavat tunnusluvutSeulonnan tuloksena saadut tekijät:

- 0,006 mm:n läpäissyt lajitemäärä, [%]
- 0,02 mm:n läpäissyt lajitemäärä, [%]
- 0,125 mm:n läpäissyt lajitemäärä, [%]
- 0,25 mm:n läpäissyt lajitemäärä, [%]
- 0,5 mm:n läpäissyt lajitemäärä, [%]
- 1 mm:n seulan läpäissyt lajitemäärä, [%]
- 2 mm:n seulan läpäissyt lajitemäärä, [%]
- 4 mm:n seulan läpäissyt lajitemäärä, [%]
- 8 mm:n seulan läpäissyt lajitemäärä, [%]
- yli 8 mm:n lajitemäärä, [%]
- 0,002-0,006 mm:n lajitemäärä, [%]
- 0,006-0,02 mm:n lajitemäärä, [%]
- 0,02-0,074 mm:n lajitemäärä, [%]
- 0,074-0,125 mm:n lajitemäärä, [%]
- 0,125-0,25 mm:n lajitemäärä, [%]
- 0,25-0,5 mm:n lajitemäärä, [%]
- 0,5-1 mm:n lajitemäärä, [%]
- 1-2 mm:n lajitemäärä, [%]
- 2-4 mm:n lajitemäärä, [%]
- 4-8 mm:n lajitemäärä, [%]
- siltilajitteen määrä, [%]
- hiekkalajitteen määrä (= 0,074-2 mm:n aines), [%]
- soralajitteen määrä, [%]
- hienoaineksen määrä, [%]
- hiekka-hienoainesmäärien suhde
- sora-hienoainesmäärien suhde
- hiekka-soramäärien suhde

Rakeisuuskäyristä lasketut tunnusluvut:

- hallitseva raekoko = läpäisy-% 10 vastaava raekoko, d_{10} , [mm]
- läpäisy-% 30 vastaava raekoko, d_{30} , [mm]
- läpäisy-% 40 vastaava raekoko, d_{40} , [mm]
- keskiläpimitta = läpäisy-% 50 vastaava raekoko, d_{50} , [mm]
- läpäisy-% 60 vastaava raekoko, d_{60} , [mm]
- läpäisy-% 80 vastaava raekoko, d_{80} , [mm]
- suhde d_{30} / d_{10}
- suhde d_{80} / d_{10}
- suhde d_{80} / d_{30}
- kaarevuussuhde $C_c = d_{30}^2 / d_{60} \cdot d_{10}$
- raekokosuhde $C_u = d_{60} / d_{10}$

Rakeiden muodoista lasketut tunnusluvut:

- liuskeisuus (keskiakseli / lyhin akseli)
- puikkoisuus (pisin akseli / lyhin akseli)
- muotoluku (puikkoisuus < 2,5, rakeiden määrä), [%]

Orgaanisesta aineksesta ja kemiallisista olosuhteista riippuvat tekijät:

- kalsiuminvaihtokapasiteetti, [mekv Ca / 100 g]
- natriuminvaihtokapasiteetti, [mekv Na / 100 g]
- magnesiuminvaihtokapasiteetti, [mekv Mg / 100 g]
- kaliuminvaihtokapasiteetti, [mekv K / 100 g]
- vaihtuvien kationien kapasiteetti laskettuna 1-arvoiselle metallille, [mmol]
- hienoaineksen humuspitoisuus, [%]
- hienoaineksen humuksen osuus koko näytteen massasta, [%]
- hienoaineksen humushappopitoisuus, [%]
- humushapon osuus hienoaineksen humuksesta, [%]
- humushapon osuus koko näytteen massasta, [%]
- koko näytteen humuspitoisuus, [%]
- humusluokka
- parannettu humusluokka
- hienoaineksen pH
- koko näytteen pH (mitattu 1,0 mm:n läpäisseeestä aineksesta)
- hienoaineksen sähkönjohtokyky, [μ S/cm]

TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005
- 5/1993 Arktinen tienrakentaminen, Kilpisjärven hankkeen yhteenveto. TIEL 3100011
- 2/1994 Routanousun mallintaminen, kirjallisuusselvitys. TIEL 3100013

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 68/1992 Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT), perussuunnitelma. TIEL 3200118
- 69/1992 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus. TIEL 3200119
- 78/1992 PTM-auton tuottamien tunnuslukujen käyttökelpoisuus ja vertailtavuus sekä niiden yhteys laser-mittauksiin (IRI, IRI4, PI/Laser). TIEL 3200134
- 8/1993 Sitomattoman kantavan kerroksen rakentaminen. TIEL 3200135
- 15/1993 Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200142
- 16/1993 Betonipäällysteen seuranta; Vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 1. TIEL 3200144
- 19/1993 Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. TIEL 3200145
- 20/1993 Moreeni ja sen käyttö. TIEL 3200146
- 26/1993 Bentoniittimattojen ja muovikavojen kelpoisuus pohjaveden suojaukseen, tutkimuksia ja suosituksia. TIEL 3200152
- 34/1993 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, esitutkimus. TIEL 3200159
- 36/1993 Palaturpeen käyttö lämmöneristeenä, raportti koerakenteiden rakentamisesta. TIEL 3200161
- 38/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Kirjallisuusselvitys. TIEL 3200163
- 39/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. TIEL 3200164
- 40/1993 Teiden tasaisuusmittareiden vertailu; PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasitukseen. TIEL 3200165
- 41/1993 Stabiloidun materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja muodon vaikutus puristuslujuuteen. TIEL 3200166
- 47/1993 Väsymissuorat tierakenteen mitoitus varten. TIEL 3200172
- 59/1993 Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P - Virala. TIEL 3200184
- 60/1993 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä - Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
- 68/1993 Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
- 77/1993 Moreenin jalostaminen. TIEL 3200201
- 81/1993 Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi, tutkimusraportti. TIEL 3200205
- 82/1993 Emulsiopäällysteiden suunnittelu ja rakentaminen. TIEL 3200206
- 4/1994 Strategic Highway Research Program (SHRP) - Long-Term Pavement Performance (LTPP); Materiaalimodulin määrittäminen takaisinlaskentaohjelmalla sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit. TIEL 3200213

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 8/1994 Roudan vaikutusten mallintaminen. TIEL 3200219
- 12/1994 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1992-1993. Roudan sulamisen simulointi, pohjaveden pinnan vaikutus korkeassa lämpötilassa ja päällysteen reunan vaikutus. TIEL 3200223
- 28/1994 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Vuoden 1993 kuormituskokeet. TIEL 3200238
- 30/1994 Kallioleikkaukset. TIEL 3200240
- 45/1994 Maan routimisen termomekaaninen malli ja sen laskelmat. TIEL 3200254
- 47/1994 Masuunihiekan käyttö päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200256
- 53/1994 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, loppuraportti. TIEL 3200262
- 3/1995 Kuormituskestävyyden tavoitekriteerit. TIEL 3200281
- 15/1995 Betonipäällysteen seuranta, vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 2. TIEL 3200293
- 20/1995 Sään ja hydrologisten tekijöiden vaikutus kevätkelirikoon. TIEL 3200298
- 30/1995 TPPT:n laatusuunnitelma. TIEL 3200308
- 43/1995 Tukitelineperustusten kantokyky. TIEL 3200319
- 44/1995 Kaltevan maanpinnan vaikutus perustusten kantokykyyn. TIEL 3200320
- 45/1995 Maanvaraisten perustusten kantokyvyn laskenta elementtimenetelmällä. TIEL 3200321
- 54/1995 Veittotensuon koerakenteen toiminta ja laadun arviointi. TIEL 3200330
- 58/1995 Kestävän kehityksen tierakenteet - ideakilpailu. TIEL 3200333
- 94/1995 Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus. TIEL 3200369
- 6/1996 Tuotannon laatu; Kuormitus ja routakestävyysrakenteet. TIEL 3200375
- 13/1996 Masuunihiekkastabilointi. TIEL 3200382
- 16/1996 Tavoitekriteerit (TPPT). TIEL 3200385
- 17/1996 Moreenin hyötykäytön edistäminen murskausteknisin keinoin (TPPT). TIEL 3200386
- 29/1996 Tien rakennekerrosmateriaalin stabilointi masuunikuonatuotteilla. TIEL 3200397
- 2/1993 *(Geotekniikan informaatiojulkaisuja:)*
Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 23/1993 Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200149
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150
- 39/1994 Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä. TIEL 3200248
- 42/1994 Nauhapystyöjitus. TIEL 3200251
- 67/1994 Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje. TIEL 3200276
- 79/1995 Tieleikkausten pohjatutkimukset. TIEL 3200354